

Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen

## **Kerrosstabilointien käyttöiän arvioinnin ja tuotehyväksynnän kehittäminen**

Tiehallinnon selvityksiä 46/2007



**TIEHALLINTO**  
VÄGFÖRVALTNINGEN

Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen

## **Kerrosstabilointien käyttöiän arvioinnin ja tuotehyväksynnän kehittäminen**

Tiehallinnon selvityksiä 46/2007



*Kannen kuva: Harri Ahola*

Verkkojulkaisu pdf ([www.tiehallinto.fi/julkaisut](http://www.tiehallinto.fi/julkaisut))

ISSN 1459-1553

ISBN 978-951-803-965-8

TIEH 3201072-v

**Tiehallinto**

Tietekniikka

Opastinsilta 12A

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelinvaihde 0204 22 11

**Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen: Kerrosstabilointien käyttöön arvioinnin ja tuotehyväksynnän kehittäminen.** Helsinki 2007. Tiehallinto, Tietekniikka. Tiehallinnon selvityksiä 46/2007, 58 s. + liitt. 7 s. ISSN 1459-1553, ISBN 978-951-803-965-8, TIEH 3201072-v.

**Asiasanat:** kantava kerros, komposiitti, masuunihiekka, rakenteen parantaminen, remix, sementtistabilointi, stabilointi, vaahtobitumi, käyttöikä, tuotehyväksyntä

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen avulla luotiin perusta kerrosstabilointien kokeellisten käyttöön arviointimenetelmien kehittämiseksi ja tuotettiin vertailuaineisto neljästä kerrosstabilointityypistä (VBST-, KOST-, MHST- ja SST-referenssimateriaaleista) uusien stabilointituotteiden tuotehyväksyntää varten.

Stabiloidun materiaalin käyttöikä voidaan määrittää kokemukseen perustuvan tiedon avulla, kokeellisten menetelmien avulla tai laskennallisin menetelmin. Kokemukseen perustuva tieto hankitaan seurantamittauksin olemassa olevista rakenteista tai täysmittakaavakokeissa. Kokeelliset menetelmät perustuvat vertaileviin laboratoriotestauksiin, joilla pyritään määrittämään materiaalin tai rakenteen turmeltumista käytännön olosuhteissa. Laskennalliset menetelmät perustuvat turmeltumisen analyttiseen jäljittelemiseen matemaattisin menetelmin. Uuden tuotteen käyttöikä voidaan arvioida kokeellisesti myös samankaltaisen tunnetun vertailutuotteen käyttöön sekä molempien tuotteiden laboratoriossa määritettyjen käyttöikä- ja säilyvyystietojen avulla.

Laboratoriokokeita ja kenttäkokeita yhdistelmällä voidaan lyhentää käyttöikä-tiedon keräämiseen tarvittavaa aikaa verrattuna pelkän kokemuseräisen tiedon keräämiseen. Rakenteen käyttöikä voidaan arvioida mitoittamalla, mutta toistaiseksi käyttöikämitoituksen työkalut ovat keskeneräisiä. Tutkimus tuotti merkittävästi lisätietoa mitoituksessa käytettävän jäykkyysmoduulin säilyvyydestä. Jäykkyysmoduulin säilyvyys vaihtelee materiaalikohtaisesti ja se tulisi ottaa huomioon mitoitusmoduulia valittaessa.

Tutkimuksessa tehtiin neljälle referenssistabilointityypille (VBST, KOST, MHST ja SST) koesarjat, joissa määritettiin niiden suola-pakkaskestävyys sekä jäykkyys- ja deformaatio-ominaisuuksien (tai vaihtoehtoisesti lujuusominaisuuksien) riippuvuus pakkasrasituksen määrästä. Aineisto sisältää myös näiden parametrien herkkyytstarkastelun rakeisuuden, bitumipitoisuuden ja tiiviiden muutoksille.

Tutkimuksen tuloksina todettiin, että jäädytys-sulatusrasituksen määrä vaikuttaa merkittävästi stabiloitujen kerrosten jäykkyyden ja deformaatiokestävyyden säilymiseen. Laboratoriossa määritetyt mitoitusparametrit (jäykkyysmoduuli ja deformaatiokestävyys) tulisi tästä syystä määrittää myös jäädytys-sulatussykliä jälkeen. Yleensä suurin osa muutoksesta tapahtui ensimmäisen 20 jäädytys-sulatussyklin aikana.



**Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen:** Development of base course stabilization service life evaluation and product approval. Helsinki 2007. Finnish National Road Administration. FINNRA Report 46/2007, 58 p. + app. 7 p. ISSN 1459-1553, ISBN 978-951-803-965-8, TIEH 3201072-v.

**Key words:** base course, trial, composite, blast furnace slag, remix, cement, stabilization, foam bitumen, service life, product approval

## **ABSTRACT**

This study provides a basis for the development of experimental service life evaluation methods of base course stabilizations. It also produced reference data of four base course stabilization types for new stabilization product approval (foam bitumen, composite, blast furnace slag and cement stabilizations).

The service life of a stabilized material may be determined using data based on experience, with experimental methods or with calculation methods. The data based on experience will be obtained by monitoring existing structures or full scale trials. The experimental methods are based on laboratory testing which are aimed at determining the deterioration of a material or structure in operating circumstances. The calculating methods are based on analytical simulation of deterioration using mathematical methods. The service life of a new product may also be evaluated experimentally with aid of the service life of a similar conventional reference product and service life and durability properties of both products tested in a laboratory.

The time necessary for obtaining service life data may be shortened compared with obtaining experimental data by connecting laboratory tests and full scale trials. The service life of a structure may be evaluated by measuring, but until now the tools of service life measuring were incomplete. The study produced significantly new data about the consistency of stiffness modulus used in measuring. The consistency of stiffness modulus varies relating to materials and it should be taken into account when choosing the measuring modulus.

The study tested four stabilization types (foam bitumen, composite, blast furnace slag and cement stabilizations) to examine their freeze-salt resistance and relation between the number of freeze-thaw cycles and stiffness and deformation resistance (or compressive strength). The data also contains the sensitivity inspection of these parameters relating to changes of gradation, binder content and density.

As result of the study it was found, that the number of freeze-thaw cycles has a significant effect to the consistency of stiffness modulus and deformation resistance. The measuring parameters determined in the laboratory (stiffness modulus and deformation resistance) should be determined for this reason also after the freeze-thaw cycles. Usually the majority of changes occurred during the first 20 freeze-thaw cycles.

## ESIPUHE

Tutkimus on osa INFRA-teknologiaohjelman projektista "Tien kerrostabiloinnin käyttöikä ja tuotehyväksyntä" (STABIL).

Tutkimuksen rahoittajat ovat Tekes, Tiehallinto, Destia, Andament Oy, Lemminkäinen Oy, NCC Roads Oy, Skanska Asfaltti Oy, Valtatie Oy, Ruukki Production ja Finnsementti Oy. Projektin johtoryhmään ovat kuuluneet:

Lars Forstén	Lemminkäinen Oy, pj.
Tom Warras 31.8.2005 asti	TEKES
Osmo Rasimus 1.9.2005 – 31.5.2006	TEKES
Ilkka Jussila 1.9.2006 alkaen	TEKES
Harto Rätty 28.2.2006 asti	Infra-teknologiaohjelma
Kari Lehtonen	Tiehallinto
Teuvo Kasari	Destia
Seppo Määttänen	Lemminkäinen Oy
Harri Ahola	Skanska Asfaltti Oy
Jukka Juola	Andament Oy
Alpo Mänttari 31.12.2005 asti	NCC Roads Oy
Petri Järvensivu 1.1.2006 alkaen	NCC Roads Oy
Sami Horttanainen	Valtatie Oy
Marko Mäkikyrö	Rautaruukki Oy
Pia Rämö	Finnsementti Oy

Lisäksi tutkimusta ohjaavaan laajennettuun johtoryhmään ovat kuuluneet seuraavat henkilöt:

Arvo Lähde	Tiehallinto, Vaasan tiepiiri
Mats Reihe 31.12.2006 asti	Tiehallinto
Tuomo Kallionpää	Tiehallinto
Katri Eskola	Tiehallinto
Taina Rantanen 30.4.2005 asti	Ins.tsto A-Tie Oy
Laura Apilo 31.8.2005 asti	VTT
Heikki Kukko 1.9.2005 alkaen	VTT
Rainer Laaksonen	VTT
Kyösti Laukkanen	VTT

Projektin johtoryhmä asetti työn tutkimusmenetelmäteknisiä asioita ohjaamaan pienryhmän, johon kuuluivat:

Lars Forstén	Lemminkäinen Oy
Ilmo Hyyppä 30.4.2006 asti	TKK
Ville Alatyppö 1.5.2006 alkaen	TKK
Rainer Laaksonen	VTT
Kyösti Laukkanen	VTT

Tutkimusraportin ovat laatineet dipl.ins. Kyösti Laukkanen ja dipl.ins. Rainer Laaksonen VTT:sta.

Helsingissä joulukuussa 2007

Tiehallinto  
Tietekniikka



**Sisältö**

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>9</b>
1.1	Yleistä	9
1.2	Tavoite	9
1.3	Tehtävät	9
<b>2</b>	<b>AINEISTO JA MENETELMÄT</b>	<b>11</b>
2.1	Materiaalit	11
2.2	Tutkimusmenetelmät	11
2.2.1	Yleistä	11
2.2.2	Käyttöiän kokeellinen määrittäminen	12
2.2.3	Perinteiset tutkimusmenetelmät	16
2.2.4	Uusia menetelmiä	16
2.3	Mitoitus	18
2.4	Näytevalmistus	19
2.5	Suhteitus	20
2.5.1	Yleistä	20
2.5.2	Masuunihiekkastabilointi	20
2.5.3	Sementtistabilointi	23
2.5.4	Valitut koostumukset	25
<b>3</b>	<b>TULOKSET</b>	<b>27</b>
3.1	Yleistä	27
3.2	Vaahto-bitumistabilointi	27
3.3	Komposiittistabilointi	30
3.4	Masuunihiekkastabilointi	38
3.5	Sementtistabilointi	41
<b>4</b>	<b>KÄYTTÖIKÄTARKASTELU</b>	<b>45</b>
4.1	Yleistä	45
4.2	Teiden käyttöiän arviointimenetelmät	45
4.3	Mahdollisia käyttöiän arviointimenettelyitä	48
4.4	Käyttöiän arviointi mitoittamalla	48
4.5	Esimerkki käyttöikä tarkastelusta	50
<b>5</b>	<b>STABILOINTIEN TUOTEHYVÄKSYNTÄ</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSIÄ</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>KIRJALLISUUSVIITTEET</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>LIITTEET</b>	<b>58</b>





# 1 JOHDANTO

## 1.1 Yleistä

Tutkimus sisältyi INFRA-teknologiaohjelmaan projektina "Tien kerrosstabilointin käyttöikä ja tuotehyväksyntä" (STABIL). Tutkimus oli jatkoa Infrarakenteiden käyttöikä tutkimuksen (INFRA SERVICELIFE) yhteydessä aloitetulle projektille "Stabiloitu rakennekerros tie- ja katurakenteessa".

INFRA-STABIL-projekti sisälsi kolme osatutkimusta:

- Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämistutkimus
- Kerrosstabilointien täysmittakaavakokeet
- Kerrosstabilointien käyttöiän arvioinnin ja tuotehyväksynnän kehittäminen.

Tämä raportti sisältää viimeksi mainitun osatutkimuksen tulokset neljästä yleisessä käytössä olevasta kerrosstabilointityypistä:

- vaahtobitumistabilointi (VBST)
- komposiittistabilointi (KOST)
- masuunihiekkastabilointi (MHST)
- sementtistabilointi (SST).

Remix-stabilointia tutkittiin INFRA-STABIL-projektin toisessa osatutkimuksessa [1]. Tässä käyttöiän arviointitutkimuksessa sitä ei käsitelty, koska VBST-stabiloinnin arvioitiin riittävän bitumistabilointien referenssimassatyypiksi.

## 1.2 Tavoite

Stabilointien kehittämistutkimuksen tavoitteena oli luoda perusta kerrosstabilointien kokeellisten käyttöiän arviointimenetelmien kehittämiseen ja tuottaa tutkittua käyttöikä tietoa ja vertailuaineisto neljästä kerrosstabilointityypistä (VBST-, KOST-, MHST- ja SST-referenssimateriaaleista) uusien stabilointituotteiden tuotehyväksyntää varten.

## 1.3 Tehtävät

Stabilointien tuotehyväksyntäperusteiden raakaversiossa [2] on esitetty alustava ehdotus, miten bitumista ja/tai hydraulista sideainetta sisältävä uusi stabilointituote tulee tutkia tuotehyväksynnän yhteydessä. Edellä mainitun ehdotuksen mukaan uuden tuotteen säilyvyysominaisuuksia arvioidaan laboratorioolosuhteissa suhteessa referenssituotteen vastaaviin ominaisuuksiin ja kenttäolosuhteissa vanhojen tuotteiden tunnetun ja uusien tuotteiden arvioidun vaurioitumisnopeuden perusteella. Työ ei sisällä uusien mitoitusjärjestelmien kehittämistä, mutta tuo kuitenkin uusia näkökohtia ja menetelmiä mitoitusparametrien kokeellista selvittämistä varten.

Referenssimassatutkimukset tehtiin tämän projektin puitteissa vaahtobitumistabiloinnille, komposiittistabiloinnille, masuunihiekkastabiloinnille ja sementtistabiloinnille.

Tuotehyväksyntäperusteiden raakaversiossa [2] on esitetty useita stabilointien käyttöön arvioinnin menetelmävaihtoehtoja (esim. moduulin säilyvyys), joilla voidaan tutkia uuden stabilointituotteen ominaisuuksien säilyvyys laboratoriokeihin. Näiden menetelmien toimivuus ja niiden tuottamien tulosten käyttökelpoisuus selvitettiin tämän tutkimuksen avulla.

Tutkimuksen avulla on pyritty kehittämään uusien stabilointituotteiden käyttöön arvioinnin menettelytapa, joka perustuu tuotehyväksynnän laboratoriokeiden ja koerakenteiden tutkimustuloksiin.

Tutkimuksessa testattiin tuotehyväksyntäperusteiden raakaversiossa [2] esitetyn laboratoriokeisarjan toimivuus käyttäen edellä mainittuja referenssistabilointityyppejä. Laboratoriokeiden avulla tuotettiin säilyvyysparametrien ja jäykkyyshäviömoduulien referenssitieto uusien tuotteiden tuotehyväksynnän laboratoriokeiväisiin tutkimuksia varten.

Tutkimuksessa yhteydessä on selvitetty myös mahdollisuuksia yhdenmukaistaa kantavan kerroksen stabilointien tuotehyväksyntämenettely Ruotsin ja mahdollisesti myös Norjan kanssa. Vähimmäistavoite oli selvittää edellytykset, joilla yhdessä Pohjoismaassa hyväksytty stabilointituote hyväksyttäisiin myös toisessa Pohjoismaassa ilman lisäselvityksiä.



## 2 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 2.1 Materiaalit

#### Raaka-aineet

Tutkittujen massojen raaka-aineet valittiin projektin edelliseen vaiheeseen sisältyneessä kerrosstabilointien kehittämistutkimuksessa [1].

Stabilointimassojen kiviaines oli kalliomurske Teiskon granodioriitti. Murskeen rakeisuusvaihtoehdot A – C, (liite 1) valittiin Asfalttinormien 2000 lisälehden kuvien 29 ja 30 mukaisten stabilointien yleisten ohjealueiden rajakäyrien perusteella. Rakeisuustavoitteen saavuttamiseksi murskeeseen lisättiin hienoainesta. Lisättävä hienoainesseos koottiin kaupallisesti saatavista hienoainemineraaleista. Tarvittaessa massoihin lisättiin mineraaleista koottua hienoaineseosta, jolla oli sama mineraalikoostumus kuin Teiskon murskeella. Asfalttirouhetta ei käytetty.

Vaahdotumibitumistabilointi sisälsi sideaineena Nynas Oy:n toimittama bitumia B160/220, johon lisättiin tartuketta (Raisio Yhtymän diamiini Raisamin DT). Muissa massoissa ei käytetty tartuketta. Bitumi lisättiin massaan vaahdotettuna.

Komposiittistabilointi sisälsi bitumisena sideaineena bitumia B160/220, joka lisättiin vaahdotettuna. Hydraulisena sideaineena oli Finnsementti Oy:n valmistama SR-sementti. SR-sementti valittiin tässä tutkimuksessa laboratorio-kokeissa käytettäväksi sementtilaaduksi, koska sen tieteellinen toistettavuus saattaa olla parempi kuin Yleissementin. Hyvää koostumuksen toistettavuutta tarvittiin, koska tutkitut stabilointimassat muodostavat vertailuaineiston myöhemmin tehtäville tutkimuksille. Käytännön kerrosstabilointityössä käytetään yleensä Yleissementtiä.

Masuunihiekkastabiloinnin sideaineena oli SR-sementillä aktivoitu Rautaruukin Raahan tehtaan masuunihiekka. Sementtistabiloinnin sideaine oli SR-sementti.

#### Tutkitut stabilointimassatyypit

Osatutkimus ”Stabilointien käyttöön arvioinnin ja tuotehyväksynnän kehittämistutkimus” rajattiin neljään Stabilointiohjeen [3] mukaiseen stabilointityyppiin: VBST, KOST, MHST ja SST. Valitut massakoostumukset on esitetty kohdassa 2.5.

### 2.2 Tutkimusmenetelmät

#### 2.2.1 Yleistä

Stabilointien ominaisuuksien tutkimusmenetelminä käytetään yleisesti bitumilla tai sementillä sidottujen päällysteiden tutkimusmenetelmiä. Perusmenetelmä useiden ominaisuuksien tutkimisessa on halkaisuvetolujuuden tai puristuslujuuden määrittäminen, jonka avulla tutkitaan näytteiden lujuuden muutoksia eri lämpötiloissa tai erilaisten rasitusten jälkeen (vesi-, pakka- ja/tai suolarasitus). Halkaisuvetolujuusmäärittäksen etuja ovat sen suhteellisen alhainen hinta, tulosten nopea saatavuus ja tulosten vertailukelpoisuus muilla materiaaleilla aiemmin saatuihin tuloksiin.

Bitumilla sidottuja materiaaleja on perinteisesti tutkittu halkaisuvetolujuuskokeilla ja sementillä sidottuja materiaaleja on vastaavasti tutkittu puristuslujuuskokeella ja rakentamishojien laatuvaatimukset perustuvat suurelta osin näihin menetelmiin.

Käyttöikä tutkimuksen menetelmät valittiin siten, että niillä mitattiin käyttöiän vaikutusta stabiloitujen rakennekerrosten mitoituksessa tarvittavaan jäykkäysmoduuliin tai rakennekerrokselta käyttöolosuhteissa vaadittaviin keskeisiin ominaisuuksiin (deformaatiokestävyys, veden-, pakkasen- ja suolankes- tävyys).

Tässä tutkimuksessa käsiteltiin kerrosstabiloinnin käyttöiän kokeellista mää- ritysmenetelmää. Muita tietuotteiden käyttöiän määrittämis- tapoja käsiteltiin useis- sa muissa tämän tutkimuksen suoritusajana käynnissä olleissa tutkimuksis- sa eikä niiden kuvausta toisteta tässä yhteydessä.

## **2.2.2 Käyttöiän kokeellinen määrittäminen**

### **2.2.2.1 Yleistä**

Käyttöiän tutkimusmenetelmän tulee perustua käyttäjän tarpeisiin, rakenteen ympäristöolosuhteisiin, toimivuusvaatimuksiin ja rakennemateriaaleihin. Käyt- täjä edellyttää tiepinnalta tasaisuutta ja hyvää ajomukavuutta. Suomen olo- suhteissa rakenteita rasittavat erityisesti talven pakkaset, nastarengasliiken- ne, raskaat ajoneuvot ja kesällä myös hellesäät.

Pitkään käytössä olleiden tuotteiden ikäkäyttäytymisestä (vanhenemisesta) kertyy ajan mittaan kokemuksesta tietoa ja niiden turmeltumismekanismit ja vaurioitumisnopeus tunnetaan yleisellä tasolla aiempien käyttökokemusten perusteella. Näin ainakin oletetaan, vaikka se ei aina pidä kovin hyvin paika- ansa. Vaikka tuotteita käytetään monien vuosien ajan, niiden toimivuuden seuranta on usein puutteellista eikä kokemuksesta tietoa dokumentoida kunnolla. Tästä huolimatta pitkään käytössä olleiden tuotteiden käyttöiästä on parempi tieto kuin uusien tuotteiden osalta. Suunnittelijalla, tilaajalla tai ura- koitsijalla on siten jonkinlainen käsitys näiden tuotteiden käyttöiästä ja niiden käyttö sisältää vähän tuntemattomia säilyvyyden riskitekijöitä. Tästä huolimatta kokemuksesta käyttöikä tieto on usein varsin karkeaa: tiedetään yleisel- lä tasolla, millainen tuote sopii mihinkin käyttökohteeseen.

Käyttöiän kokeellinen määrittäminen edellyttää, että tuotteen vaurioitumisme- kanismi ja käyttöolosuhteiden aiheuttamat rasitukset tunnetaan riittävän hyvin ja että niitä pystytään jäljittelemään käytettävillä koejärjestelyillä. Kokeellinen määrittäminen vaikeutuu, jos vauriot syntyvät hyvin pitkän ajan kuluessa.

### **2.2.2.2 Käyttöikäsuunnittelu ISO 15686:n mukaan**

Käyttöiällä tarkoitetaan aikaa, jonka rakenne valmistuksen jälkeen asianmu- kaisesti huollettuna säilyttää käyttökelpoisuutensa. Käyttöikä käsitteiden ter- minologia on esitetty esim. VTT:n julkaisussa 850/2001, [4]. Standardin ISO 15686-1 mukaan suunnitteluikä on suunnittelijan ja rakennuttajan yhdessä asettama rakennuksen tai rakennusosan käyttöikä tavoite tai -vaatimus. Enna- koitu käyttöikä on rakennuksen tai rakenneosan laskettu käyttöikä, [5].

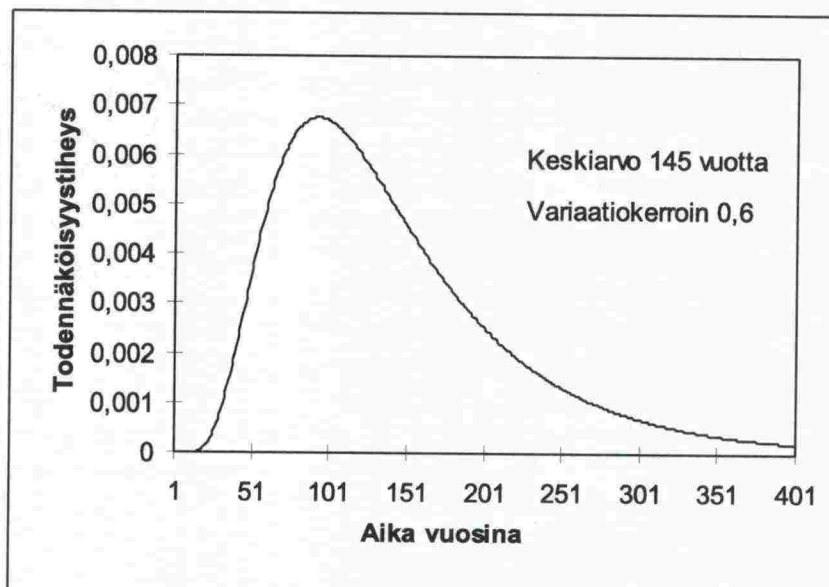


Rakennusosan tai tuotteen ennakoitu käyttöikä (ESLC) ko. kohteessa lasketaan standardin ISO 15686-1 mukaan kaavalla 1 kertomalla vertailukäyttöikä (RLSC) eri tekijöitä huomioon ottavilla käyttöiän kertoimilla (A...G).

$$ESLC = RLSC \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G \quad (1)$$

Kertoimien A...G lukuarvot riippuvat rakenneosan laatutekijöistä, ympäristöoloista ja käyttöoloista. Vertailukäyttöikä esitetään vaaditun varmuustason funktiona. Mitä suurempi varmuus käyttöiälle vaaditaan, sitä lyhyempi on vertailukäyttöikä. Käyttöiän jakauman oletetaan yleensä noudattavan läheisesti log-normaalista muotoa eli käyttöikä on jakautunut normaalisti ajan logaritmin suhteen.

Useissa lähteissä (esim. Betoninormeissa, [6]) esitetään, että käyttöiän jakauma noudattaa log-normaalista muotoa ja suunnittelukäyttöikä (käyttöiän vaatimus) oletetaan saavutettavan 95 % todennäköisyydellä, kuva 1.



Kuva 1. Esimerkki log-normalisesta jakaumakäyrästä. Tiheysfunktio, [6].

### 2.2.2.3 Käyttöiän arviointiprosessi

Tuotteen käyttöiän arviointi käynnistyy yleensä tuotteen edustajan aloitteesta. Käyttöiän arvioinnin alkuvaiheessa selvitetään alustavat edellytykset tuotteen käyttöiän määrittämiselle, tuotteen vaurioitumismekanismi, olennaiset säilyvyystekijät, arviointiperusteet ja käyttöiän toteutuksen menettely. Uusien tuotteiden osalta laaditaan tarvittaessa tuotteelle arviointiperusteet yhteistyössä tuotteen edustajien kanssa. Käyttöikä arvioidaan arviointiperusteissa esitettyjen menettelytapojen ja kriteerien mukaisesti.

### 2.2.2.4 Käyttöiän kerrointen määrittäminen laboratoriossa

Rakenneosan käyttöiän kaavan kertoimia voidaan tutkia kokeellisesti laboratoriotestien avulla. Laboratoriossa voidaan materiaaleja vanhentaa keinotekoisesti nopeutetulla tavalla. Laboratoriotestien etuna on menetelmien hyvä toistettavuus ja mahdollisuus valita olosuhteet suunnitelmallisesti, tutkia yk-



sittäisen olosuhdetekijän vaikutusta materiaaliin sekä mahdollisuus dokumentoida materiaaliin vaikuttaneet olosuhteet ja rasitukset luotettavalla tavalla.

Laboratoriokokeiden tulee pystyä jäljittelemään materiaalin käyttöolosuhteita riittävän hyvin. Niillä tulee pystyä selvittämään materiaalin vähittäin ajan mittaan tapahtuvan muuttumisen vaikutus sen käyttöominaisuuksiin. Tällöin ei riitä esim. materiaalin yksittäisen ominaisuuden (esim. lujuuden) määrittäminen, vaan lisäksi tulee määrittää ominaisuuden muutos ajan suhteen.

Määrättyjen rakenneosien joidenkin ominaisuuksien osalta voidaan käyttöikä määrittää varsin luotettavalla tavalla. Tällainen ominaisuus on esim. vilkkaasti liikennöidyn uuden tien asfalttikulutuskerroksen käyttöikä. Tien kulutuskerroksen käyttöikä voidaan laskea karkeasti jakamalla sallittu uran syvyys (mm) pinnan kulumisnopeudella (mm/v). Käyttöikälaskelmaa voidaan tarkentaa tiedoilla uusien ja vanhempien asfalttien kulumisnopeuksien eroista. Kulumisnopeuden riippuvuus eri tekijöistä esitetään lukuissa eri kestoikämallissa.

Käyttöiän arviointi vaikeutuu, kun tierakenteen käyttöikään vaikuttavat samanaikaisesti useat tekijät tai vaurioituminen on hidasta. Olisi luonnollisesti paras vaihtoehto selvittää kaikkien rasitustekijöiden ja eri vauriomekanismien aiheuttamien vaikutusten yhteisvaikutus rakenteeseen. Käytännössä joudutaan kokeelliset menettelyt kuitenkin rajaamaan siten, että huomioon otetaan vain olennaisimmat materiaaliin vaikuttavat muutostekijät.

Jos tunnetaan rakenteeseen käyttöolosuhteissa kohdistuvat rasitustekijät, voidaan käyttöikäominaisuuksia selvittää rasituskokeiden avulla. Tällaisia koemenetelmiä ovat esim. rakenteen väsytyksokeet ja kulutuskokeet.

Tuotteen käyttöikää voidaan tutkia myös altistamalla se laboratorio-olosuhteissa erilaisille fysikaalisille tai kemiallisille vaikutuksille. Tällaisten vaikutusten (esim. lämpö, vesi, pakkanen, UV, kemikaalit) avulla voidaan joko suoraan selvittää tuotteen ominaisuuksien muutosnopeus tietyissä rasitusolosuhteissa tai nopeuttaa materiaaleissa tapahtuvia muutoksia. Tyypillisiä muutoksia nopeuttavia tekijöitä ovat esim. lämpötilan nostaminen tai UV-säteilykäsittely.

Mahdollisia laboratorio-olosuhteissa toteutettavia käyttöiän määrittämiseen soveltuvia materiaalien vanhennusmenetelmiä ovat esim.:

- syklinen jäädytys-sulatuskoe,
- syklinen pakkas-suolakoe,
- säilytys vedessä,
- vanhennus kemiallisen rasituksen alaisena,
- vanhennus korotetussa lämpötilassa,
- UV-vanhennus.

Käyttöiän selvittämiseksi rakenteelle tai tuotteelle tehdään useita erillisiä materiaalin muuttumista nopeuttavia kokeita, joita kutsutaan yleisesti vanhentamiseksi. Vanhentamisella tarkoitetaan tällöin näytteen ominaisuuksien muuttumisen nopeuttamista eikä varsinaisesti iän muuttumista.

Betonitutkimuksessa on erilainen käytäntö: betonin jäädytys-sulatussykliä suoritusta kutsutaan koestamiseksi eikä käytetä tässä yhteydessä termiä vanhentaminen. Jäädytys-sulatuskokeen jälkeen näytteet voidaan puristaa.

Terminologiasta riippumatta näiden kokeiden avulla tutkitaan erilaisten rasitusten yhteisvaikutus tuotteen säilyvyysominaisuuksiin. Kullekin materiaalille sovellettava vanhentava koestusmenetelmä valitaan siten, että se vaikuttaa tuotteen olennaisiin käyttöikäominaisuuksiin. Esim. tien kantavan kerroksen materiaalin ominaisuuksien muuttumiseen vaikuttaa pakkasrasituksen määrä, koska se vaikuttaa kantavan kerroksen olennaisiin ominaisuuksiin kuten jäykkyysmoduuliin ajan funktiona. Sen sijaan esim. tiemerkinän paluuehjäystuusominaisuuden säilyvyyteen voidaan mahdollisesti vaikuttaa UV-vanhen-  
nuksella jne.

#### 2.2.2.5 Vertailurakenteet

Kokeellinen menettely soveltuu erityisesti kahden eri rakennustuotteen tai materiaalin vertailuun. Laboratoriokokeiden avulla voidaan varsin luotettavasti selvittää, ovatko tuotteen X säilyvyysominaisuudet (esim. pakkasenkestävyys) paremmat kuin tuotteen Y tietyissä rasitusolosuhteissa. Samoin voidaan selvittää, kuinka paljon enemmän tuote Y vaurioituu kuin tuote X valitun vanhen-  
nusjakson aikana.

Usein on kyseessä tilanne, että perinteisen tuotteen käyttöikä käyttöolosuhteissa tunnetaan aiempien tutkimusten tai pitkäaikaisten käyttökokemusten perusteella, mutta vaihtoehtoisen tuotteen käyttöikäominaisuuksia ei tunne-  
ta. Vertailurakenne valitaan siten, että se on samankaltainen kuin vaihtoehtoi-  
nen rakenne. Vertailurakenteita voi olla useita erilaisia, joista valitaan kuhun-  
kin tilanteeseen parhaiten soveltuva vaihtoehto. Vertailurakenteen valintakri-  
teeri on, että sen tulee olla toimintavaltaaan samankaltainen kuin uusi tuote  
(esim. samankaltainen lujuusominaisuuksien lämpötilaherkkyys). Vaikka se-  
kä tutkittavassa että vertailurakenteessa olisi sama kiviaines ja sama bitumi,  
voi niiden käyttöikä olla erilainen, jos niiden valmistusteknologia tai lisäaineet  
ovat erilaisia.

#### 2.2.2.6 Laskelmien vastaavuus käyttöolosuhteiden kanssa

Kokeellisen kerroinmenettelyn tarkkuus riippuu siitä, kuinka hyvin laborator-  
issa määritetyt säilyvyysominaisuudet vastaavat kyseisen ominaisuuden säi-  
lyvyyttä käyttöolosuhteissa. Samoin tulisi tuntea vertailurakenteen käyttöikä  
käyttöolosuhteissa. Tämä kertoimiin ja vertailukäyttöikään liittyvä epävarmuus  
liittyy myös kaikkiin muihin käyttöiän arvioinnin kerroinmenetelmiin. Voidaan  
kuitenkin todeta, että olosuhde-erojen aiheuttaman virheen vaikutus piene-  
nee, kun laskelmat tehdään suhteellisina arvoina tunnettuun tuotteeseen ver-  
rattuna.

Kokeellisessa menetelmässä käyttöiän hajonnan arviointia vaikeuttaa, että  
usein näytemäärä ei riitä tilastolliseen tarkasteluun. Jollei tarkempaa tieto ha-  
jonnasta ole, sovelletaan muussa yhteydessä kehitetty tietoa hajonnan suu-  
ruudesta (ks. kuva 1). Koska vertailutuote on valittu siten, että se on saman-  
kaltainen kuin vaihtoehtoinen tuote, myös niiden käyttöikien hajonnat voidaan  
olettaa samankaltaisiksi. Tämä pienentää hajontojen arvioinnin mahdollisen  
epätarkkuuden vaikutusta käyttöikäarvioon.



### 2.2.3 Perinteiset tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa käytetyt perinteiset teknisten ominaisuuksien tutkimusmenetelmät (halkaisuvetolujuus, puristuslujuus, vedenkestävyys, pakkasenkestävyys, suolankestävyys ja jäykkyysmoduuli) on kuvattu projektin edellisessä raportissa [1] eikä niitä esitetä tässä yhteydessä uudelleen.

### 2.2.4 Uusia menetelmiä

#### 2.2.4.1 Syklinen jäykkyysmoduulikoe

Menetelmän avulla määritetään säilytysolosuhteiden, veden ja pakkasen vaikutus rakennekerrosmateriaalin jäykkyysmoduuliin. Menetelmässä määritetään jäykkyysmoduuli ajan funktiona valittujen, tarkoin säädeltyjen rasisussyklien jälkeen.

Materiaali turmeltuu kokeen aikana vähitellen rasisussyklien vaikutuksesta.

Jäykkyysmoduuli määritetään samasta näytteestä

- kokeen alussa säilytyskosteustilassa,
- vesiupotuksen jälkeen ja
- toistuvasti tiettyjen jäädytys-sulatussyklimäärien jälkeen. Näytteet jäädytetään ilmassa (-20 °C) ja sulatetaan vedessä (+20°C).

#### 2.2.4.2 Syklinen deformaatio- tai puristuslujuuskoe

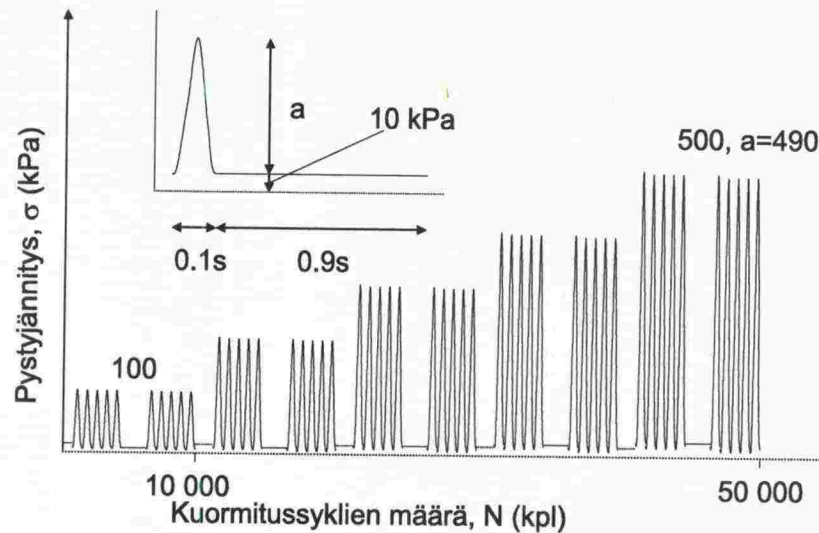
Jos materiaalille on ominaista, että se voi vaurioitua käyttöolosuhteissa deformatumalla, tutkitaan pakkasrasituksen määrän vaikutus materiaalin deformaatiokestävyyteen. Deformaatio määritettiin ennen pakkasvanhennusta ja toistuvasti tiettyjen jäädytys-sulatussyklimäärien jälkeen.

Deformaatio tutkittiin portaittain nousevalla kuormalla. Kuormitusportaat valittiin siten, että kuormitustasojen määrä ja kuormitustaajuus olivat sopivia, kuva 2. Kuormitusportaita tulisi olla vähintään viisi, jotta deformaatiokäyttäytymisestä kuormituksen funktiona saa hyvän kuvan.

Kuormitustaajuus oli 1 Hz (10 000 sykliä, 0.1 s pulssi ja 0.9 s lepo). Lepokuorma on vakio tai 10 % maksimikuormasta. Viisi kuormitustasoa, jotka voivat olla esim. 100, 200, 300, 400 ja 500 kPa.

Koska näyte rikotaan kokeessa, tarvitaan kuhunkin määrittämiseen eri näyte. Syklisen deformaatiokokeen lämpötilana käytettiin 30 °C (prEN 12697-25A menetelmässä lämpötila oli 40 °C). Perusteluna lämpötilan alentamiselle oli, että kantavassa kerroksessa valitsee alhaisempi lämpötila kuin pinnassa ja EN-tuotestandardin mukaiset alemmat testilämpötilat kantavan kerroksen asfalttimateriaaleille.





Kuva 2. Syklisen deformaatiokokeen kuormitusperiaate.

#### 2.2.4.3 Ultraäänimittaukset

Ultraäänimenetelmä perustuu siihen, että äänen (pulssin) etenemisnopeus kiinteässä materiaalissa (esim. betonissa) on riippuvainen materiaalin tiheydestä ja elastisista ominaisuuksista. Materiaalin laatua (ja eheyttä) sekä jäykkyyttä voidaan arvioida äänen (pulssin) etenemisnopeuden avulla.

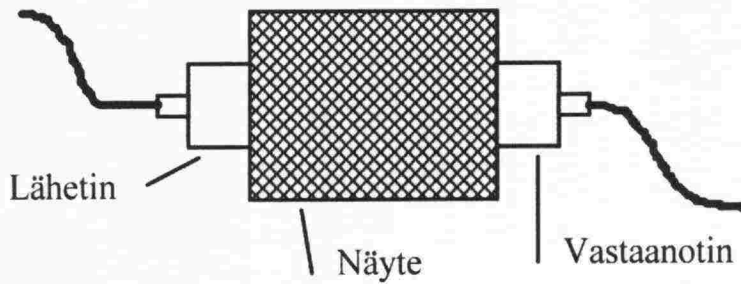
Sauvamaaisessa kappaleessa tapahtuvan pitkittäissuuntaisen aallon (pulssin) etenemisnopeus voidaan esittää kaavan 2 avulla.

$$v = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right) \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

missä E on dynaaminen moduuli  
 ρ tiheys  
 ν Poisson luku  
 v nopeus

Mittauksen periaate:

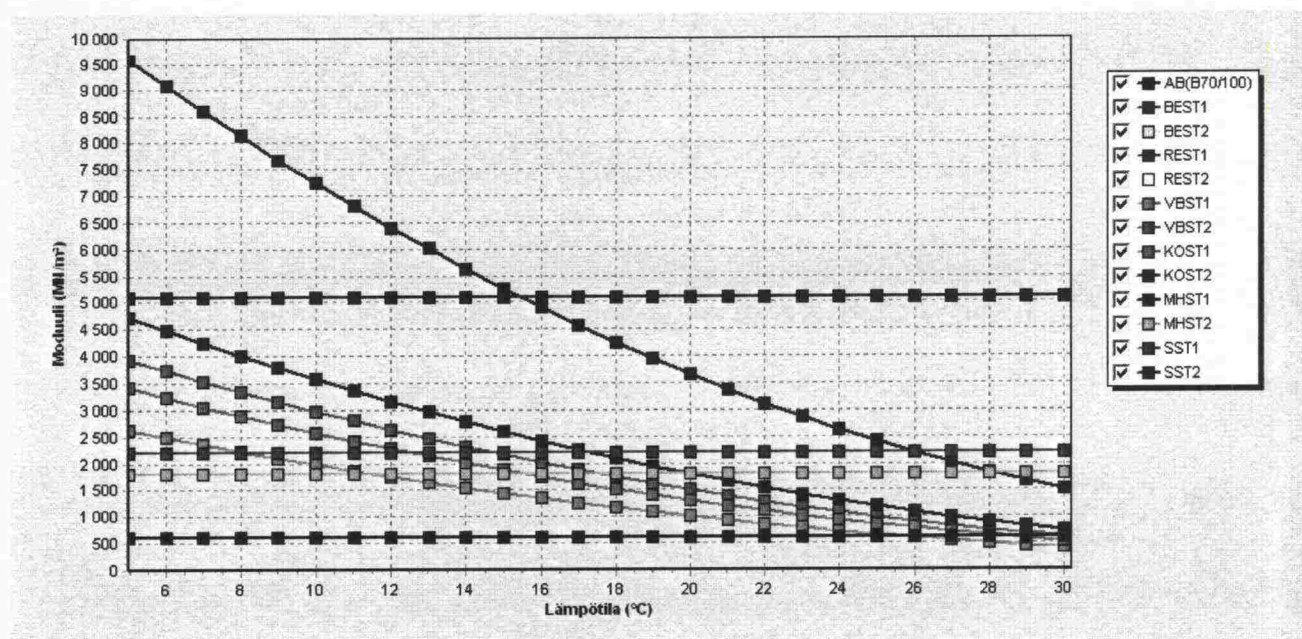
Mittalaite lähettää lähetin-kappaleeseen korkeataajuisen pulssin (tai pulssijonon, taajuus n. 50 kHz), joka muunnetaan lähettimessä sähköisestä värähtelystä mekaaniseksi suunnatuksi värähtelyksi pietsosähköisen elementin avulla. Lähettimestä lähtenyt aaltoliike kulkee näytekappaleen läpi ja saapuu vastaanottoon, jossa mekaaninen värähdysliike muunnetaan takaisin sähköiseen muotoon. Mittalaitteen elektroniikka laskee pulssin kulkuajan näytteenä. Lähetin-/vastaanotinparit kalibroidaan aina ennen mittausta tunnetun kappaleen avulla. Lähetin-/vastaanotinkappaleen kosketus näytteen kanssa varmistetaan "liisterin" avulla. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 3 (kuvassa näyte on kyljellään).



Kuva 3. Ultraäänimittausjärjestelyn periaate.

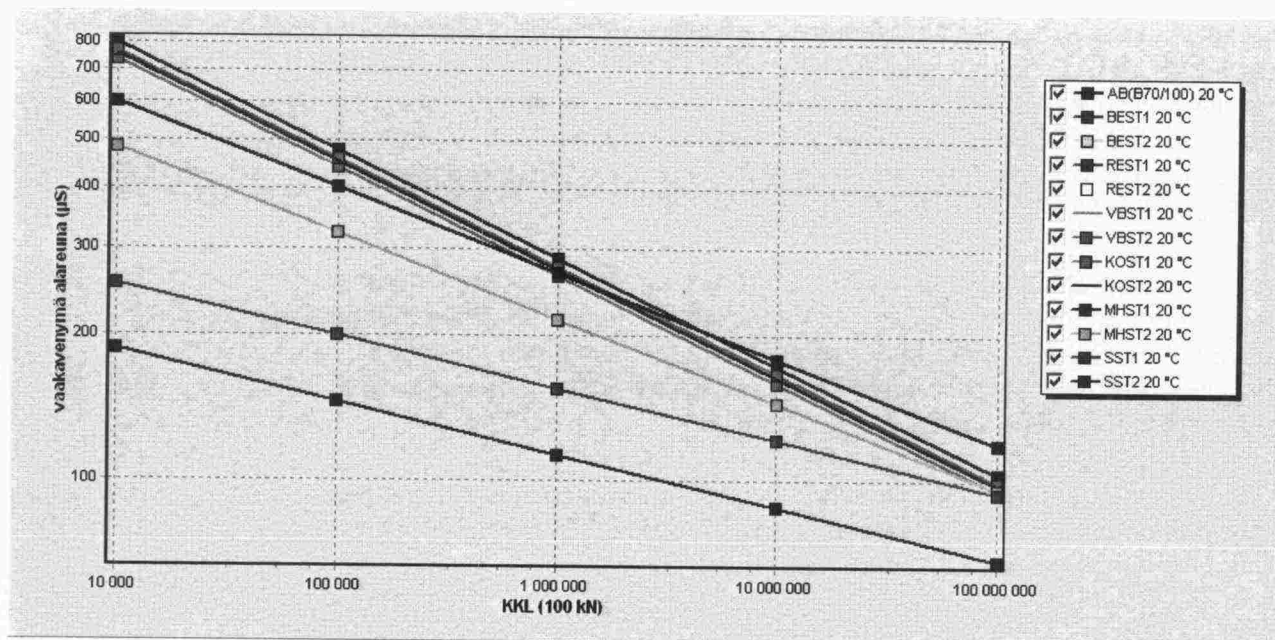
### 2.3 Mitoitus

Kuvassa 4 on esitetty mitoitusohjelmassa APAS 2006 annetut asfalttibetonin ja eri stabilointityyppien jäykkyyshmoduulit lämpötilan funktiona ja kuvassa 5 APAS:n väsymissuorat samoille materiaaleille.



Kuva 4. APAS-ohjelman jäykkyyshmoduuleja (AB ja stabilointeja).





Kuva 5. APAS-ohjelman väsymissuoria (AB ja stabilointeja).

Kuvien 4 ja 5 mukaan stabiloitu kerros voidaan kestoikämitoituksessa (APAS-3:n mukaan) käsitellä sidottuna, väsytystä kestäväenä materiaalikerroksena. APAS-3 sisältää jopa väsymisfunktiot mitoitus varten eräille stabiloiduille materiaaleille. Osalla (runsaammin bitumia sisältävillä) materiaaleilla menettely voi olla toimiva ja perusteltu.

Valtaosalla uusista komposiiteista oletus, että se käyttäytyy kuten tavanomainen bitumilla sidottu materiaalikerros, ei kuitenkaan ole perusteltua. Tämä johtuu siitä, että näissä materiaaleissa on vähän vetoa kestävää, sitkeää sideainetta ja materiaali on epähomogeenista. Lisäksi vesi ja pakkanen purkavat heikkoja sidoksia. Tällöin mitoitus kannattaa tehdä kuvaamalla stabiloitu kerros sitomattomaksi, korkeamman jäykkyyden omaavaksi kerrokseksi.

Stabiloidun materiaalikerroksen osalta tulee tarkastella myös sen deformaatiokestävyys, eli esim. rajata kerroksen yläpintaan vaikuttava pystyjännitys tasolle, joka ei vielä aiheuta haitallista tiivistymistä tai leikkautumista kerroksessa. Materiaali- ja kohdekohtainen raja-arvo voidaan etsiä esim. käyttäen kolmiakksiaalisia, usealla kuormitustasolla toistettuja deformaatiokokeita. Näiden kokeiden sellipaine voidaan valita esimerkiksi asfaltituotestandardin (SFS-EN 13108-20) mukaan, jolloin kantavan kerroksen kokeissa sellipaine on 50 kPa [12].

## 2.4 Näytevalmistus

### Massan sekoitus ja tiivistäminen

Stabilointimassat sekoitettiin laboratoriossa asfaltinsekoittimella ja näytteet tiivistettiin kiertotiivistimellä (ICT 150) noin 155 mm korkuisiksi.

Stabilointimassanäytteiden koostumus valittiin suhteituskokeissa. Massan vesipitoisuudeksi valittiin Proctor-kokeen mukaisen optimivesipitoisuuden ja lisäbitumipitoisuuden erotus ottaen huomioon, että massan minimivesipitoisuus oli 2,5 %.



Stabilointimassat sekoitettiin laboratorion isolla sekoittimella, jossa annoskoko oli noin 28 kg. Yhdestä sekoitusannoksesta tiivistettiin 3 – 4 näytettä. Näytteet tiivistettiin ICT-kokeiden perusteella valittuun suunniteltuun tavoitetiiveyteen (92...98% ICT:llä 200 r tiivistetyn massan tiiveydestä). ICT:n asetusparametrit olivat: paine näytteen pinnassa 600 kPa, kulma 17,5 mrad ja kierrosnopeus 30,6 rpm (CEN asetukset).

Vaahdotumistabilointimassaan lisättiin tartuketta, joka sekoitettiin kuumaan bitumiin ennen vaahdotusta. Bitumi vaahdotettiin käsityönä (bitumin vaahdotuslämpötila 170 °C ja vaahdon vesipitoisuus 2,5 % bitumin määrästä). Kuuma bitumivaahdo kaadettiin käynnissä olevassa sekoittimessa olevien kiviainesten (T= 20-23 °C) päälle.

KOST-massan sementin ja bitumin pitoisuuksien suhteeksi valittiin ennakkokokeiden perusteella 0,33. (Sementin pitoisuus laskettiin tässä tutkimuksessa runkoaineen massasta ja bitumin pitoisuus päällysteen massasta).

### **Näytemäärä, säilytys- ja koestusolosuhteet**

Näytteiden säilytysolosuhteet niiden valmistuksen ja koestuksen välisenä aikana valittiin massan sideaineen lajin perusteella. Varastointilämpötila oli noin 23 °C. VBST- näytteet säilytettiin huoneilmassa ritilän päällä. KOST-, MHST- ja SST-näytteet säilytettiin kosteissa olosuhteissa (20...23 °C/ RH 90...95 %).

Suhteituskoenäytteitä varastoitiin pääasiallisesti 7 vrk ennen niiden koestukseen liittyviä esikäsittelyjä (mahdollinen rikitys, vesiupotus, temperointi).

Pakkasen- tai suolankestävyys syklisen jäädytys-sulatusvanhennuksen jälkeen tutkittiin halkaisuvetolujuus- tai puristuslujuuskokeella.

Toiminnallisia ominaisuuksia tutkittaessa koestukseen liittyvät esikäsittelyt tai vanhennukset (jäädytys-sulatus-sykli tai suola-pakkasvanhennussykli) aloitettiin, kun näytteiden ikä oli 28 d (MHST 91 d).

## **2.5 Suhteitus**

### **2.5.1 Yleistä**

VBST- ja KOST-massojen koostumukset oli suhteitettu tutkimuksen edellisessä vaiheessa [1]. Niiden rakeisuuskäyrät on esitetty liitteissä 2-4. MHST- ja SST-massat suhteitettiin Stabilointiohjeen 2002 mukaan puristuslujuuden perusteella.

### **2.5.2 Masuunihiekkastabilointi**

Tiehallinnon Stabilointiohjeen mukaan aktivoidun MHST:n puristuslujuustavoite on 1– 2 MPa (28 d iässä) ja 3 MPa (91 d iässä).

Masuunihiekkastabilointien optimikoostumus valittiin suhteituskokeiden perusteella. Suhteitusmääritykset tehtiin kolmella eri kiviaineen rakeisuudella (A, B ja C), joista rakeisuus A sisälsi eniten hienoaainesta ja rakeisuus C vähiten. Rakeisuuskäyrävaihtoehdoissa otettiin huomioon masuunihiekan vaikutus rakeisuuteen siten, että masuunihiekka oli rakeisuussuhteituksessa mukana yh-

tenä lajitteena. Sementti ei ollut mukana rakeisuussuhteituksessa. Kiviaines-  
 ten rakeisuuskäyrät on esitetty liitteissä 5-7.

Suhteituskokeissa tutkittiin taulukon 1 mukaiset koostumusvaihtoehdot. Näyt-  
 teet olivat lieriön muotoisia (D 150 mm, h 155 mm). Massojen optimikosteus-  
 det arvioitiin Proctor-kokeiden perusteella. Rakeisuudella B tavoitettiin vas-  
 tasi 95 % Proctor-tiiveydestä (näytteet tehtiin ennen menetelmämuutosta, jos-  
 sa vaihdettiin tavoitettiin valintamenetelmä kiertotiivistinkokeisiin perustu-  
 vaksi): Rakeisuuksilla A sekä C MHST-massan suhteituskoenäytteet tiivistettiin  
 tavoitettiin tiiveyteen, joka vastasi 96 % ICT 200 r tiivistetyn näytteen tiiveydestä.

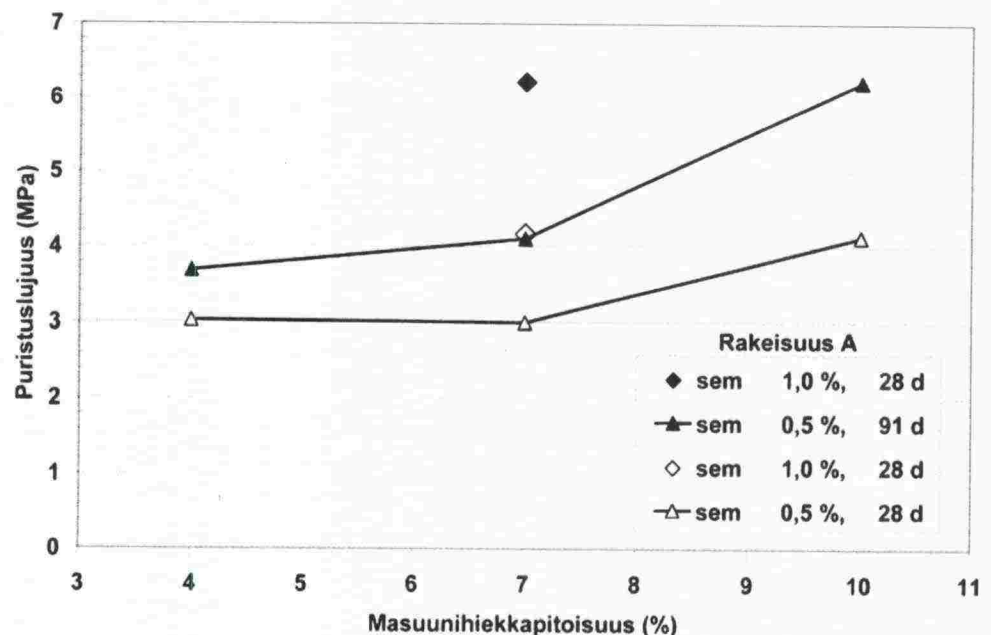
Taulukko 1. Suhteituskokeiden MHST-näytteiden sideaine- ja aktivaattoripitoisuu-  
 det.

Rakeisuus	A	A	A		A	
MHk %	4,0	7,0	10,0		7,0	
Sem %	0,5	0,5	0,5		1,0	
Rakeisuus	B	B	B	B	B	B
MHk %	4,0	7,0	10,0	4,0	7,0	10,0
Sem %	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
Rakeisuus	C	C	C		C	
MHk %	4,0	7,0	10,0		7,0	
Sem %	0,5	0,5	0,5		1,0	

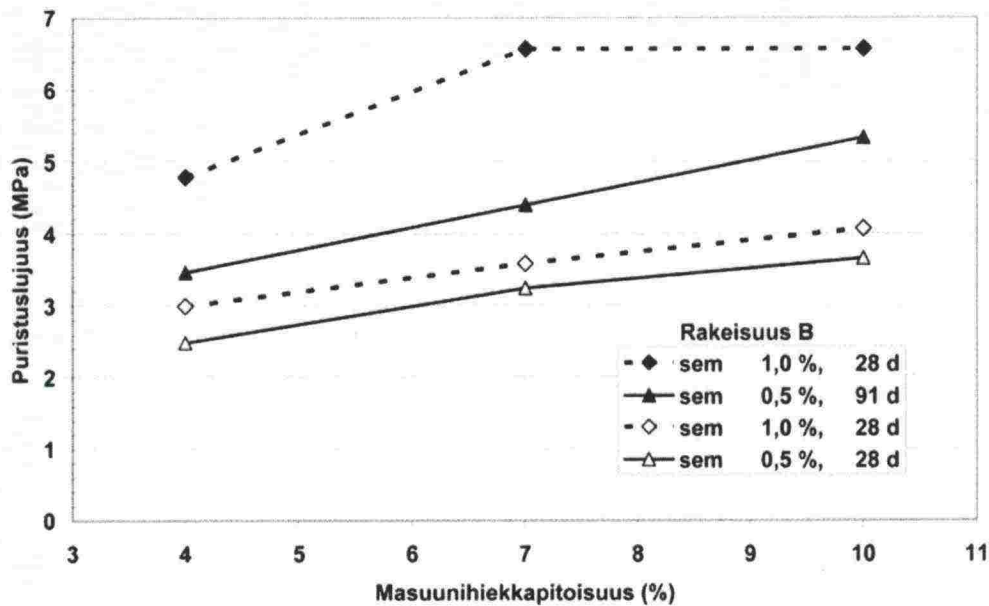
Näytteiden puristuslujuudet tutkittiin 28 d ja 91 d iässä.

MHST-näytteiden puristuslujuustulokset on esitetty kuvissa 6-8.

Suhteituskokeiden perusteella valittiin kaikille kolmelle MHST-rakeisuudelle  
 koostumus, joka sisälsi sideaineena 6 % MHk ja aktivaattorina 0,5 % sement-  
 tiä.

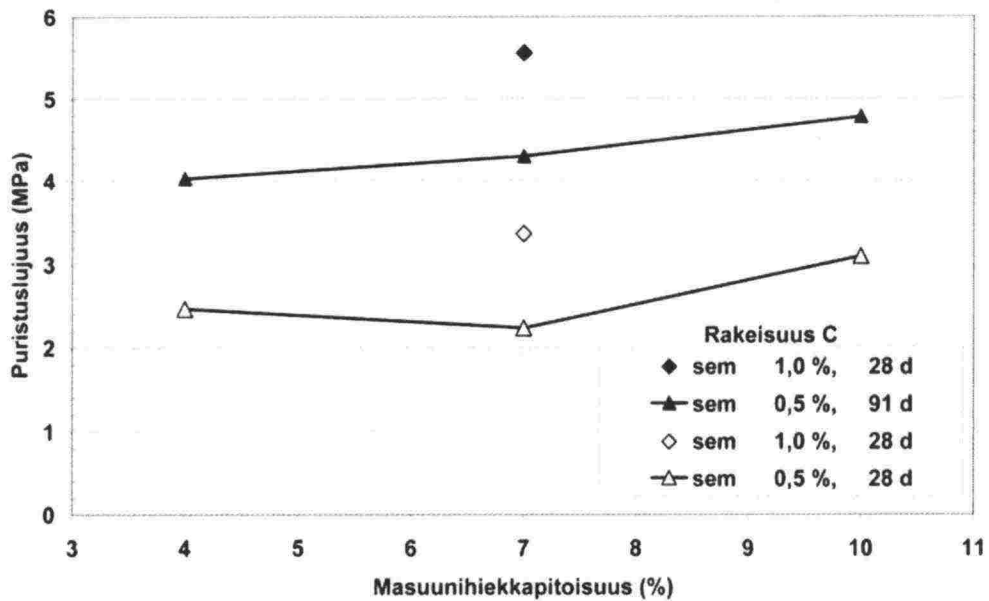


Kuva 6. MHST-massan puristuslujuus, rakeisuus A (28d ja 91d)



Kuva 7. MHST-massan puristuslujuus, rakeisuus B (28d ja 91d)

Kuva 8. MHST-massan puristuslujuus, rakeisuus C (28d ja 91d)





### 2.5.3 Sementtistabilointi

Stabilointiohjeen 2002 mukaan kantavan kerroksen sementtistabilointinäytteiden puristuslujuustavoite suhteituskokeissa on 7-10 MPa.

Sementtistabiloinnin optimissideainepitoisuus valittiin suhteituskokeiden perusteella. Suhteitusmääritykset tehtiin kolmella eri kiviaineksen rakeisuudella (A, B ja C), joista rakeisuus A sisälsi eniten hienoainesta ja rakeisuus C vähiten.

Rakeisuuskäyrävaihtoehdot suhteitettiin pelkästä kiviaineksesta ilman sementtiä, koska tämän menettelyn katsottiin kuvaavan paikalla rakentamisen työmenetelmää. (Vaihtoehtoinen menettely olisi ollut valita rakeisuuskäyrän hienoainepitoisuus kiviainekseen sisältyvän hienoaineksen ja sementin pitoisuuksien summan mukaan). Kiviainesten rakeisuuskäyrät on esitetty liitteissä 2-4.

Kullakin rakeisuudella tutkittiin puristuslujuus käyttäen kolmea eri sementtipitoisuutta (2 %, 4 % ja 6 % sementtiä kuiva-ainesten massasta, 3 rinnakkaisnäytettä/koostumus).

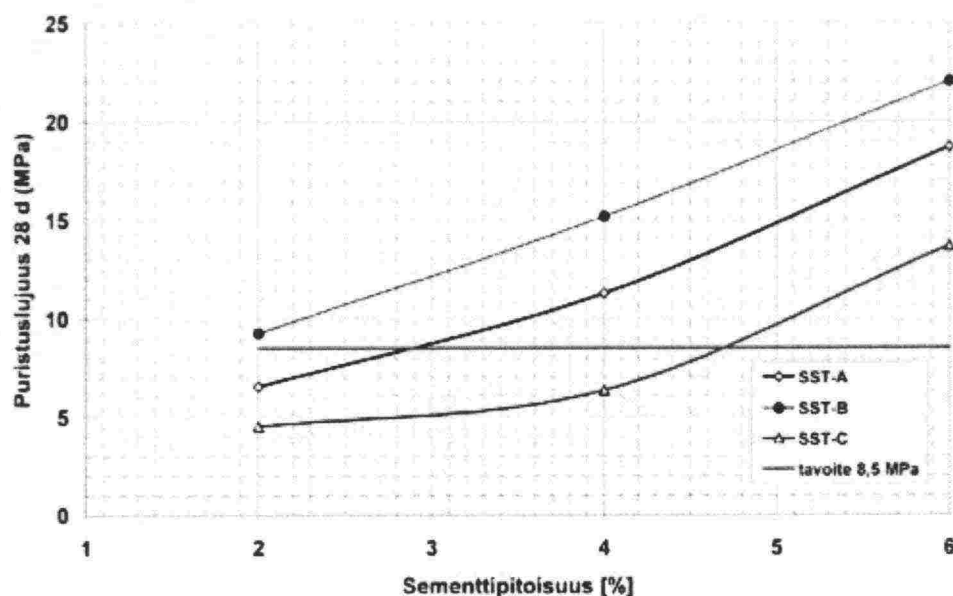
Näytteet olivat lieriön muotoisia (D 150 mm, h 155 mm) ja niiden oli tiiveys 96 % ICT:n 200 r vastaavasta tiiveydestä. Puristuslujuus määritettiin, kun näytteiden ikä oli 28 d.

SST-näytteiden puristuslujuustulokset on esitetty kuvassa 9. Sementtipitoisuudella 2 % puristuslujuus vaihteli rakeisuudesta riippuen välillä 4,5 – 9,3 MPa. Kun sementtipitoisuus oli 4 %, vaihteli puristuslujuus vastaavasti välillä 6,4 – 11,3 MPa.

SST-stabilointien tutkimukseen pyrittiin valitsemaan kullekin rakeisuudelle (A, B ja C) optimisementtipitoisuus ja lisäksi rakeisuudelle B tuli valita alhaisempi sementtipitoisuus, joka sisältää sementtiä 80 % optimista.

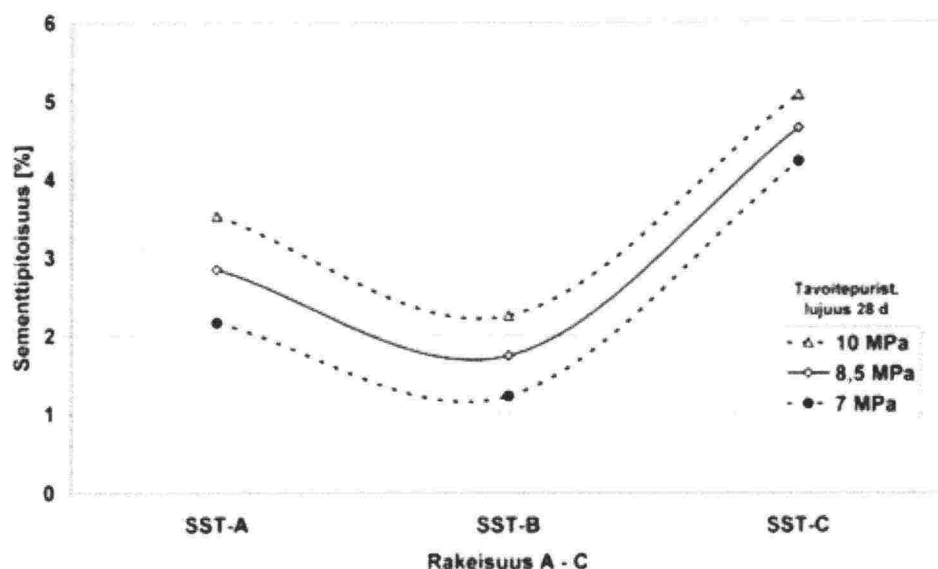
Jos SST-massan lujuustavoitteeksi valitaan Stabilointiohjeen ohjealueen keskiarvotaso (8,5 MPa, 28 d), tämä lujuus saavutetaan suhteituskokeiden perusteella kuvan 9 mukaan:

- rakeisuudella A, kun sementtipitoisuus on 2,9 %
- rakeisuudella B, kun sementtipitoisuus on 1,7 %
- rakeisuudella C, kun sementtipitoisuus on 4,7 %.



Kuva 9. Sementtistabilointinäytteiden puristuslujuuden (28 d) riippuvuus rakeisuudesta (A-C) ja sementtipitoisuudesta.

Kuvassa 10 on havainnollistettu, miten rakeisuudella B saavutetaan tavoitepuristuslujuustaso oleellisesti alhaisemmalla sementtipitoisuudella kuin rakeisuudella C tai A. Kuvan perusteella on todettavissa rakeisuuden B soveltuvan olennaisesti paremmin sementtistabilointiin kuin esim. rakeisuus C. Näin suuri ero sideainemenekissä puoltaa rakeisuuden korjausta työmaaolosuhteissa tarvittaessa.



Kuva 10. Tarvittavan sementtipitoisuuden riippuvuus puristuslujuustavoitteesta ja rakeisuudesta.

Alhaisimmaksi suhteituskokeissa käytetyksi sementtipitoisuudeksi oli valittu johtoryhmässä työmaakäytännön sideainepitoisuuksien perusteella 2 %. Suhteituskokeiden perusteella perusrakeisuusvaihtoehdon B optimisementtipitoisuudeksi valittiin 2 %. Rakeisuudesta C päätettiin olla valmistamatta SST-sta-



biloinnin tutkimusnäytteitä. Sen sijaan koostumuksen S6 mukaisen SST-massan rakeisuudeksi valittiin vaihtoehto B ja sementtipitoisuudeksi 3,5 %, taul. 2.

Taulukko 2. SST-stabilointimassojen sementtipitoisuudet käyttöikä tutkimusnäytteiden valmistuksessa.

Koostumus n:o	Rakeisuus	Sementtipitoisuus %	Vesipitoisuus %	Tiiveys % ICT 200 tiiv	HUOM
S1	A	2,9	6,7	96	Rakeisuuden A optimi
S2	B	1,6	6,5	96	Vähän sementtiä (80% optimista)
S3	B	2,0	6,5	92	Alempi tiiveys
S4	B	2,0	6,5	96	Rakeisuuden B optimi
S5	B	2,0	6,5	98,4	Korkeampi tiiveys
S6	B	3,5	6,6	96	Enemmän sementtiä

#### 2.5.4 Valitut koostumukset

Massat valmistettiin kohdan 2.1. mukaisista materiaaleista. VBST- ja KOST-massoille oli suhteitettu optimikoostumus tutkimuksen edellisessä vaiheessa. MHST- ja SST-stabilointien koostumukset valittiin tämän tutkimuksen esikokeiden perusteella. Ominaisuuksien herkkyyttä koostumuksen ja tiiveyden muutoksille tutkittiin massoilla, jotka valmistettiin optimista poikkeavin sideainepitoisuuksin ja erilaisin tiiveyksin. Erilaisia stabilointimassakoostumuksia sisältyi koesuunnitelmaan 22 kpl, taulukot 3-6.

Taulukko 3. Tutkitut VBST-massavaihtoehdot.

		VBST-koostumusvaihtoehdot				
		yläraja-käyrä	vähän bit.	alempi tiiveys	perusratk	alaraja-käyrä
		V1	V3	V5	V6	V12
Rakeisuuskäyrä (kiviaines)		A	B	B	B	C
Bitumi vaahdotettuna		B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220
Bitumipitoisuus	%	4,2	3,5	4,0	4,0	3,3
Tartuke % lisäbitumista	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vesipitoisuus	%	2,5	2,6	2,5	2,5	2,8
tiiveys % ICT 200r tiiveydestä	%	96	96	92	96	96
Pakkas-suolakestävyys		x			x	
Pakkasvanhennus+moduuli		x	x	x	x	x
Pakkasvanhennus+deformaatio		x		x	x	

Taulukko 4. Tutkitut KOST-massavaihtoehdot.

		KOST-koostumusvaihtoehdot				
		yläraja- käyrä	vähän bit.	alempi tiiveys	perusratk	alaraja- käyrä
		K1	K2	K4	K5	K10
Rakeisuuskäyrä (kiviaines)		A	B	B	B	C
Bitumi vaahdotettuna		B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220
Bitumipitoisuus	%	3,2	2,5	3,0	3,0	2,5
SR-sementtipitoisuus	%	1,1	1,0	1,0	1,0	0,8
Vesipitoisuus	%	4,3	3,8	3,2	3,2	4,0
tiiveys % ICT 200r tiiveydestä	%	96	96	92	96	96
Pakkas-suolakestävyys		x			x	
Pakkasvanhennus+moduuli		x	x	x	x	x
Pakkasvanhennus+deformaatio		x		x	x	

Taulukko 5. Tutkitut MHST-massavaihtoehdot

		MHST-koostumusvaihtoehdot					
		yläraja- käyrä A	vähän MHk	alempi tiiveys	perusratk.	Jälkilujitt. Vaikutus	alaraja- käyrä C
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Rakeisuuskäyrä (kiviaines+MHk)		A	B	B	B	B	C
MHk-pitoisuus	%	6,0	4,0	6,0	6,0	6,0	6,0
SR-sementtipitoisuus	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vesipitoisuus	%						
tiiveys % ICT 200r tiiveydestä	%	96	96	92	96	96	96
Pakkas-suolakestävyys		x			x		
Pakkasvanhennus+moduuli		x	x	x	x	x	x
Pakkasvanhennus+puristusluju.		x		x	x		

Taulukko 6. Tutkitut SST-massavaihtoehdot.

		SST-koostumusvaihtoehdot					
		yläraja- käyrä A	vähän sem	alempi tiiveys	perusratk	korkeampi tiiveys	enemmän sem.
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Rakeisuuskäyrä (kiviaines)		A	B	B	B	B	B
SR-sementtipitoisuus	%	2,9	1,6	2,0	2,0	2,0	3,5
Vesipitoisuus	%	6,7	6,5	6,5	6,5	6,5	6,6
tiiveys % ICT 200r tiiveydestä	%	96	96	92	96	98,4	96
Pakkas-suolakestävyys		x			x		
Pakkasvanhennus+moduuli		x	x	x	x	x	x
Pakkasvanhennus+puristusluju.		x		x	x	x	



### 3 TULOKSET

#### 3.1 Yleistä

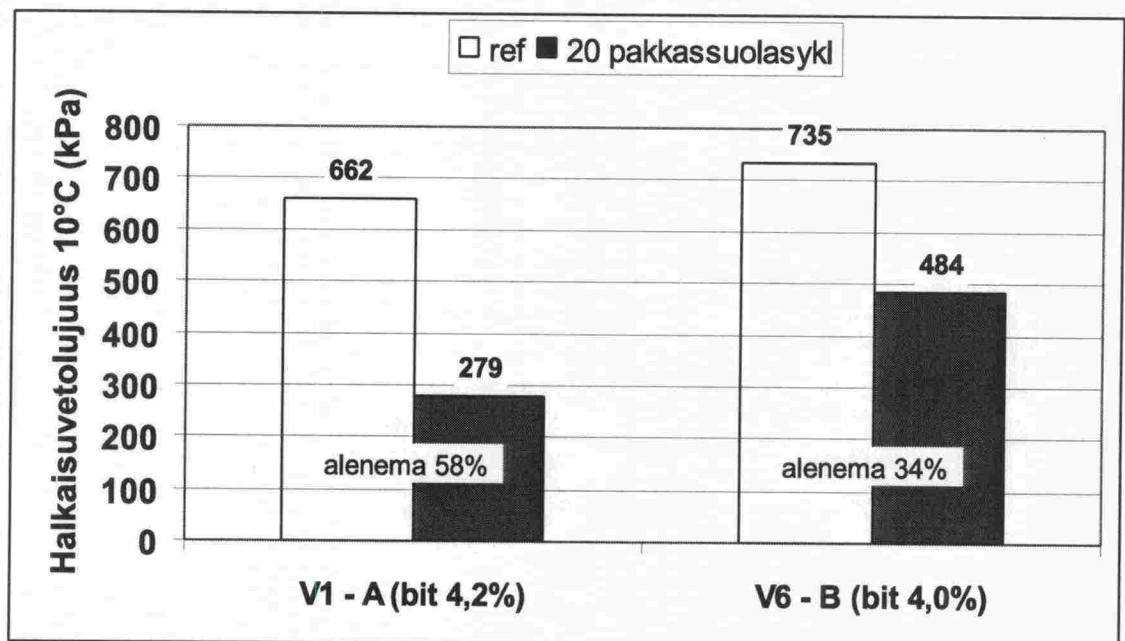
Käyttöiän kokeelliseen määrittämiseen sisältyy useita eri menetelmiä, joilla tutkitaan materiaalin tai tuotteen keskeisten käyttöominaisuuksien muuttumista ja turmeltumista ajan funktiona. Yleisten rakentamissuositusten mukaisten referenssistabilointimassojen (VBST, KOST, MHST ja SST) käyttöikäominaisuudet tutkittiin kokeellisesti. Näitä tuloksia voidaan käyttää myöhemmin referenssiaineistoina tutkittaessa uusien stabilointituotteiden käyttöikäominaisuuksia.

#### 3.2 Vaahtobitumistabilointi

##### Pakkas-suolakestävyys

Kuvassa 11 on esitetty syklisen pakkas-suolakokeen vaikutus VBST-stabilointin puristuslujuuteen 20 pakkas-suolasyklin jälkeen. Pakkas-suolarasituksen alkaessa näytteiden ikä oli 28 d. Sekä pakkasrasituksessa olleet että niiden vertailunäytteet halkaistiin syklien päättymisen jälkeen saman ikäisinä ja samassa kosteustilassa. Ennen halkaisuvetolujuuskoetta (10 °C) näytteet kasteltiin vesiupotuksessa.

Vaahtobitumistabilointimassakoostumus V6 kesti pakkas-suolakokeessa kohtalaisen hyvin, jos tulosta verrataan esim. Stabilointiohjeen [3] mukaiseen VBST:n vedenkestävyysvaatimukseen, joka sallii 60 % lujuuden aleneman tai betonirakenteiden jäädytys-sulatuskokeen vaatimukseen, joka sallii 33 % lujuuden aleneman, kuva 11.

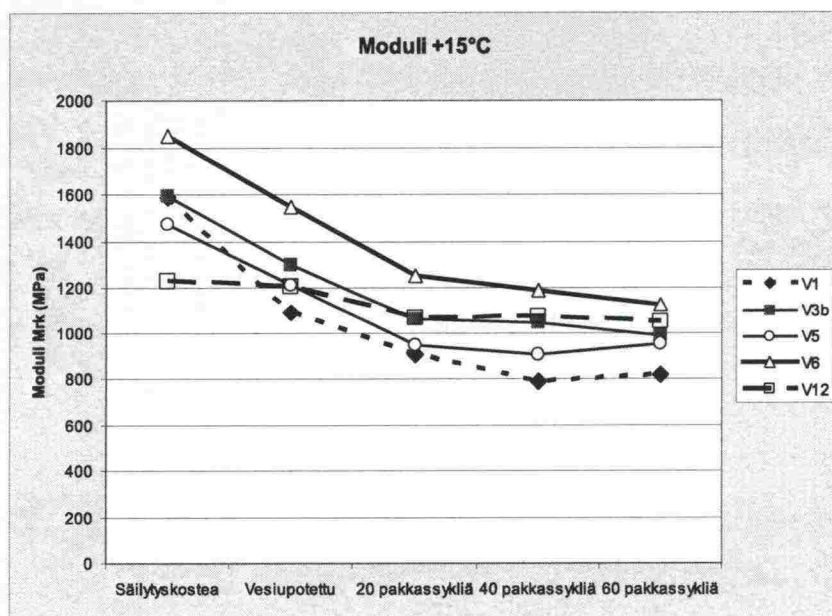


Kuva 11. VBST-stabiloinnin pakkas-suolakestävyys (20 sykliä)  
(tiiveys 96% ICT 200r).

### Jäykkyysmoduulin säilyvyys

Vaah Tobitumistabiloinnin tutkittujen (taulukon 3 mukaisten) koostumusten jäykkyysmoduuli (15 °C:ssa) varastoinnin jälkeen sekä moduulin muutos vesiupotuksen ja 20 – 60 jäädytys-sulatussyklin jälkeen on esitetty kuvassa 12.

Suurin moduulin alenema tapahtuu vesisäilytyksen ja ensimmäisten 20 jäädytys-sulatussyklin aikana. Sen jälkeen pakasrasituksen aiheuttama muutos (sidosten purkautuminen) hidastuu tai jopa pysähtyy.



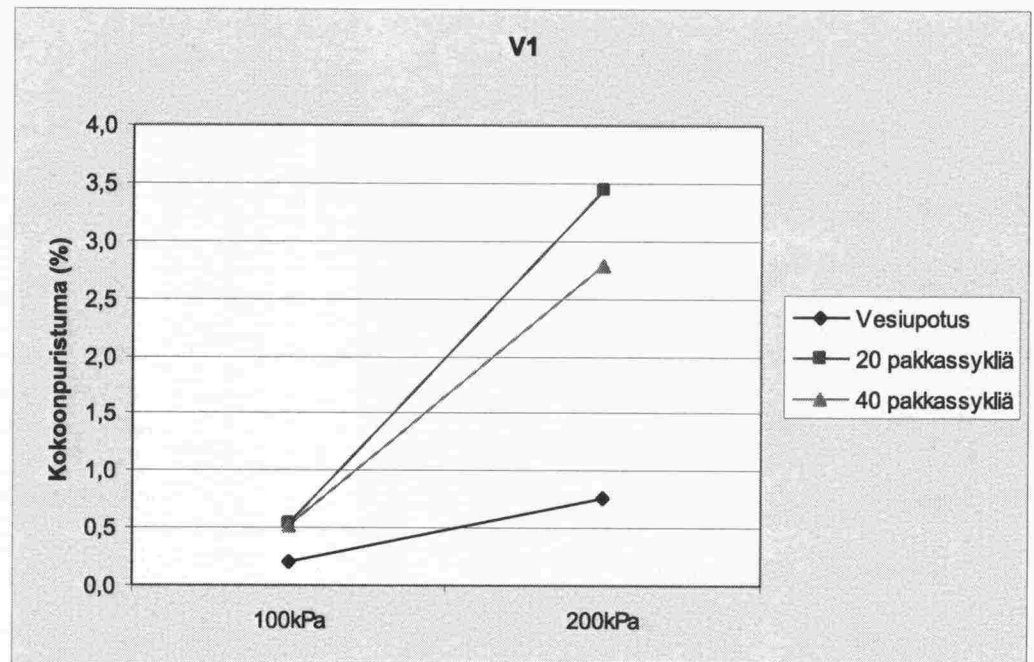
Kuva 12. VBST-koostumusten jäykkyysmoduulin riippuvuus kosteustilasta ja pakasrasituksen määrästä (1-aks. dynaaminen jäykkyysmoduulikoe).

### Deformaatiokestävyyden säilyvyys

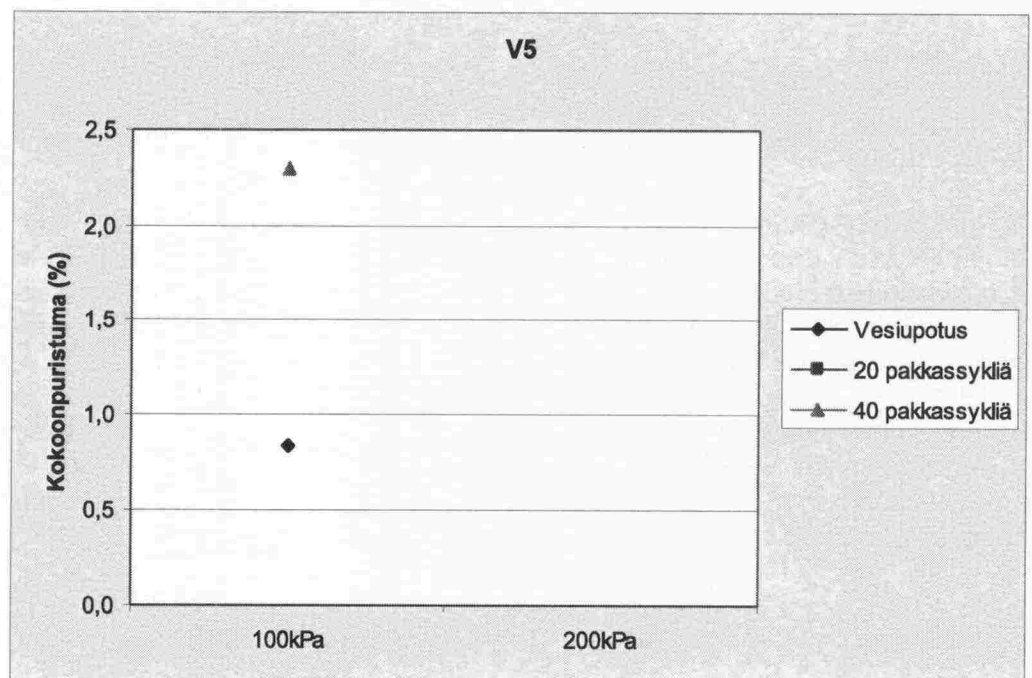
Vaah Tobitumistabiloinnin tutkittujen koostumusten deformaatiokestävyys vesiupotuksen jälkeen ja moduulin muutos vesiupotuksen ja 20 – 40 jäädytys-sulatussyklin jälkeen on esitetty kuvissa 13 – 15. Kuvissa 1 % kokoonpuristuma vastaa 1,5 mm muodonmuutosta.

Massa V1 on eniten hienoinesta sisältävä, massa V5 alempaan tiiveyteen tiivistetty ja massa V6 rakeisuuden B perusvaihtoehto. Massa V1 kesti näistä parhaiten ja vähemmän tiivistetty massa V5 muita heikommin deformaatio-kokeessa.

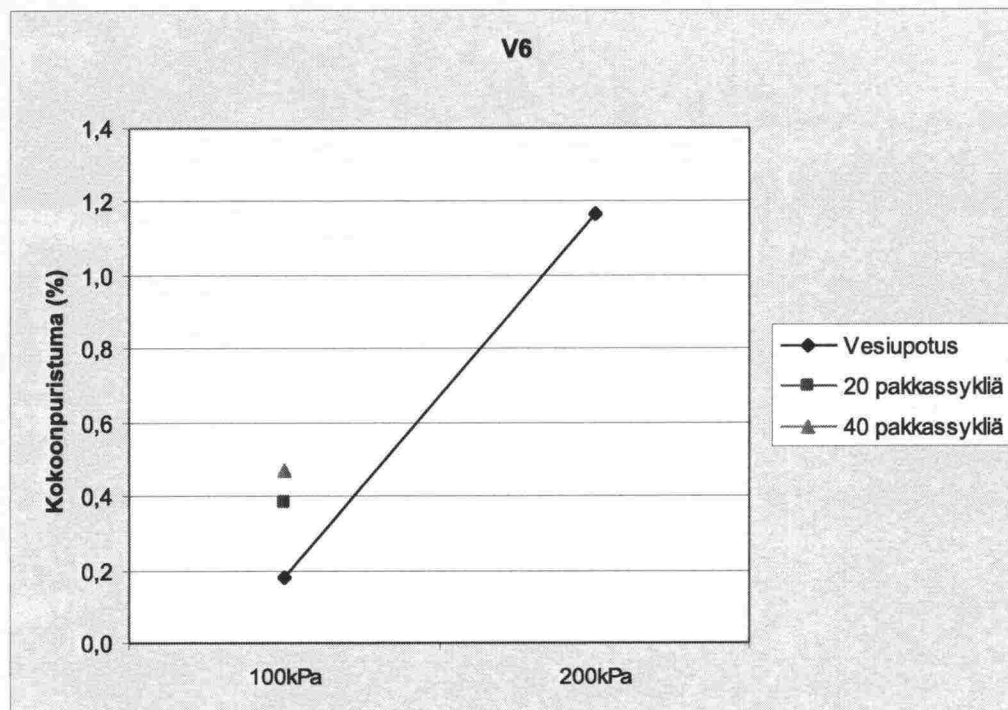




Kuva 13. VBST-massan koostumuksen V1 (rak. A) deformaatiokestävyyden riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä.



Kuva 14. VBST-massan koostumuksen V5 (rak. B) deformaatiokestävyyden riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä



Kuva 15. VBST-massan koostumuksen V6 (rak. B) deformaatiokestävyyden riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä.

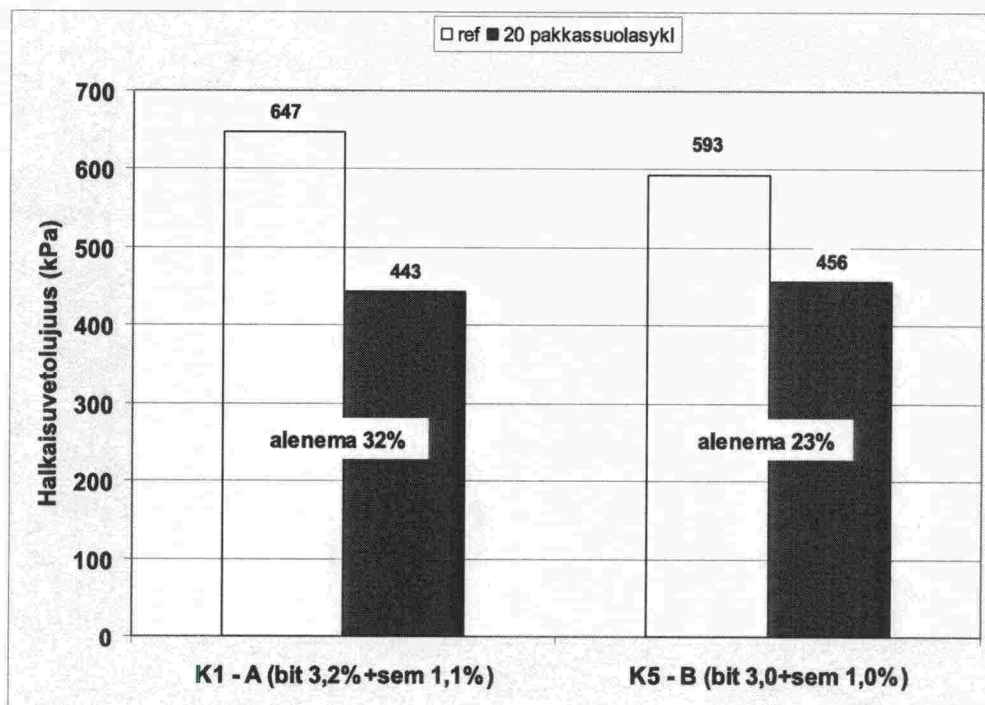
### 3.3 Komposiittistabilointi

#### Pakkas-suolakestävyys

Kuvassa 16 on esitetty syklisen pakkas-suolakokeen vaikutus KOST-stabiloinnin puristuslujuuteen 20 pakkas-suolasyklin jälkeen. Pakkas-suolarasituksen alkaessa näytteiden ikä oli 28 d. Sekä pakkasrasituksessa olleet että niiden vertailunäytteet halkaistiin syklien päättymisen jälkeen saman ikäisinä. Ennen halkaisuvetolujuuskoetta (10 °C) näytteet kasteltiin vesiupotuksessa.

Komposiittistabilointimassat kestivät pakkas-suolakokeessa hyvin, jos tulosta verrataan esim. VBST:n vedenkestävyysvaatimukseen, joka sallii 60 % lujuuden aleneman [3] tai betonirakenteiden jäädytys-sulatuskokeen vaatimukseen, joka sallii 33 % lujuuden aleneman, kuva 16.



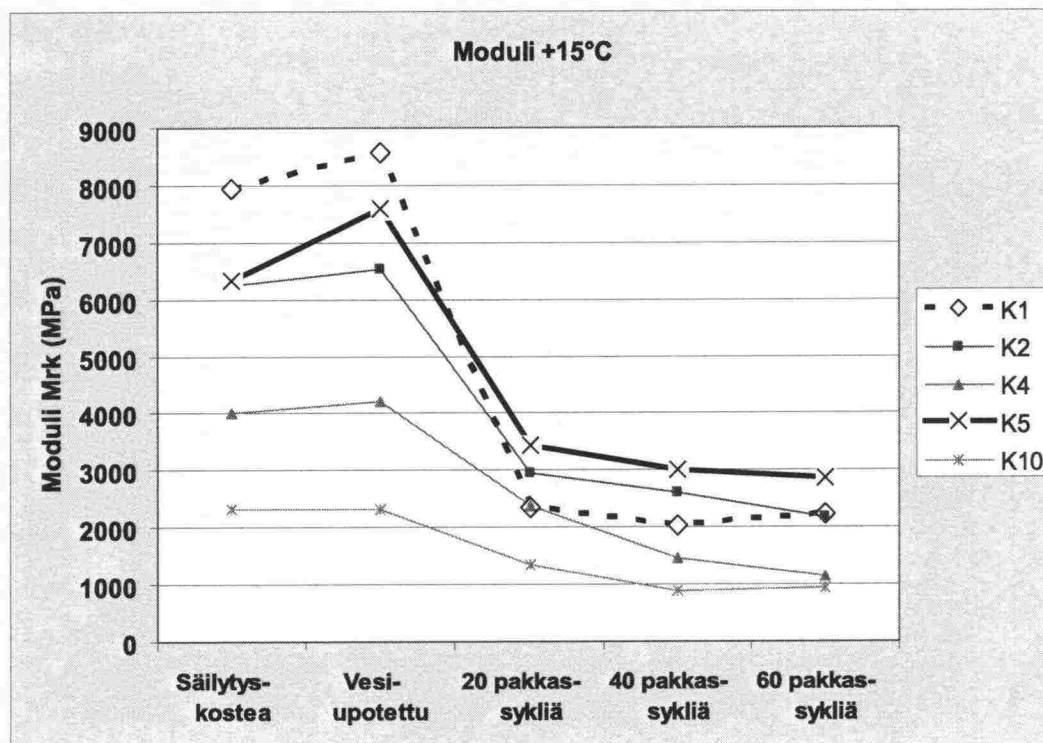


Kuva 16. KOST-stabiloinnin pakkas-suolakestävyys (20 sykliä)  
(tiiveys 96 % ICT 200r, HVL 10 °C)

#### Jäykkyysmoduulin säilyvyys (1-aksiaalinen dynaaminen koe)

Komposiittistabiloinnin tutkittujen koostumusten jäykkyysmoduuli (15°C:ssa, 1-aks. dynaaminen jäykkyysmoduulikoe) varastoinnin jälkeen sekä moduulin muutos vesiupotuksen ja 20 – 60 jäädytys-sulatussyklin jälkeen on esitetty kuvassa 17.

Useimmilla KOST-koostumuksilla vesiupotus lisäsi jäykkyyttä. Merkittävin moduulin alenema tapahtuu ensimmäisten 20 jäädytys-sulatussyklin aikana. Sen jälkeen pakkasrasituksen aiheuttama muutos vähenee tai jopa pysähtyy. KOST-massojen jäykkyys on kuitenkin vielä 60 jäädytys-sulatussykin jälkeen suurempi kuin useimpien VBST-massojen jäykkyys ennen vanhennusta.

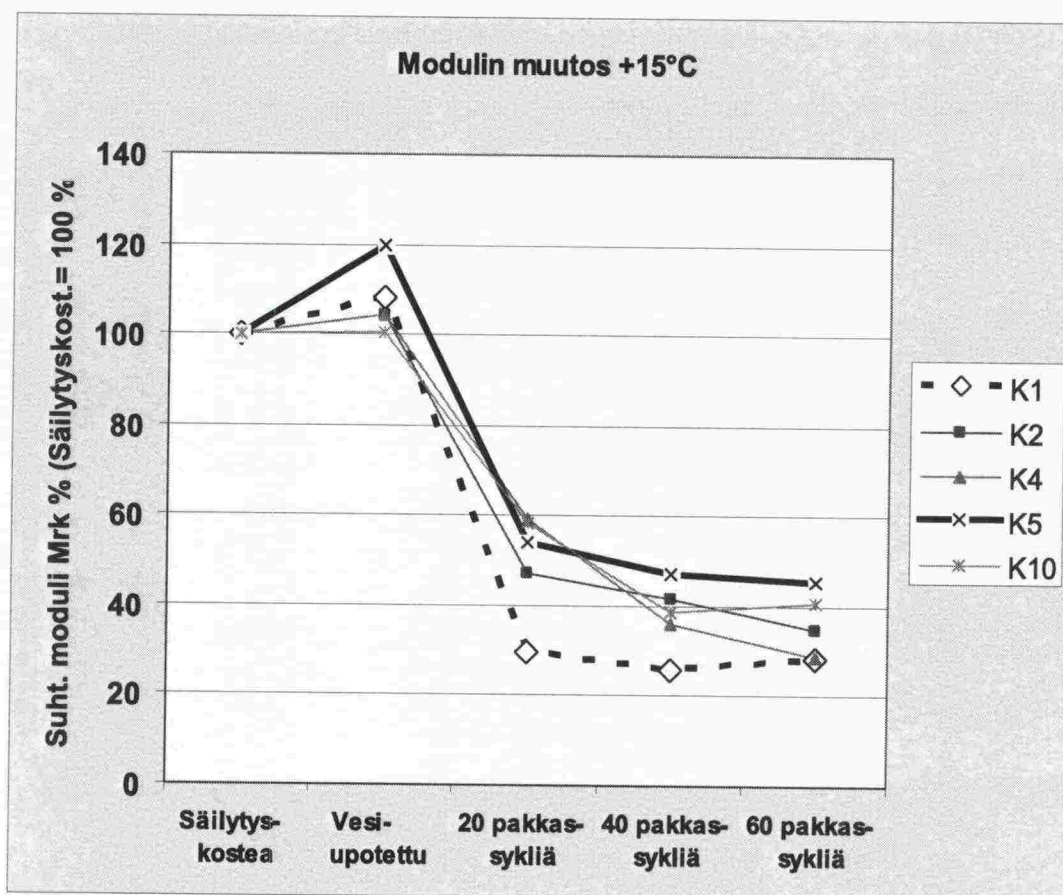


Kuva 17. KOST-koostumusten jäykkyysmoduulin riippuvuus kosteustilasta ja pakka-situksen määrästä.

Eri KOST-koostumusten moduulin muutosten vertailemiseksi on kuvassa 18 merkitty kaikkien säilytyskosteudessa olevien KOST-koostumusten jäykkyys-moduuleja luvulla 100 % ja esitetty moduulin muuttuminen suhteessa tähän vertailutasoon.

Kokeen lopussa (60 jäädytys-sulatussyklin jälkeen) on rakeisuuden B optimi-koostumuksen mukaisella massalla K5 korkein moduuli (kuva 17) ja vähäisin moduulin alenema (kuva 18).





Kuva 18. KOST-koostumusten suhteellisen jäykkyysmoduulin riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä, kun säilytyskosteudessa moduuli on 100 % ennen pakkasrasitusta.

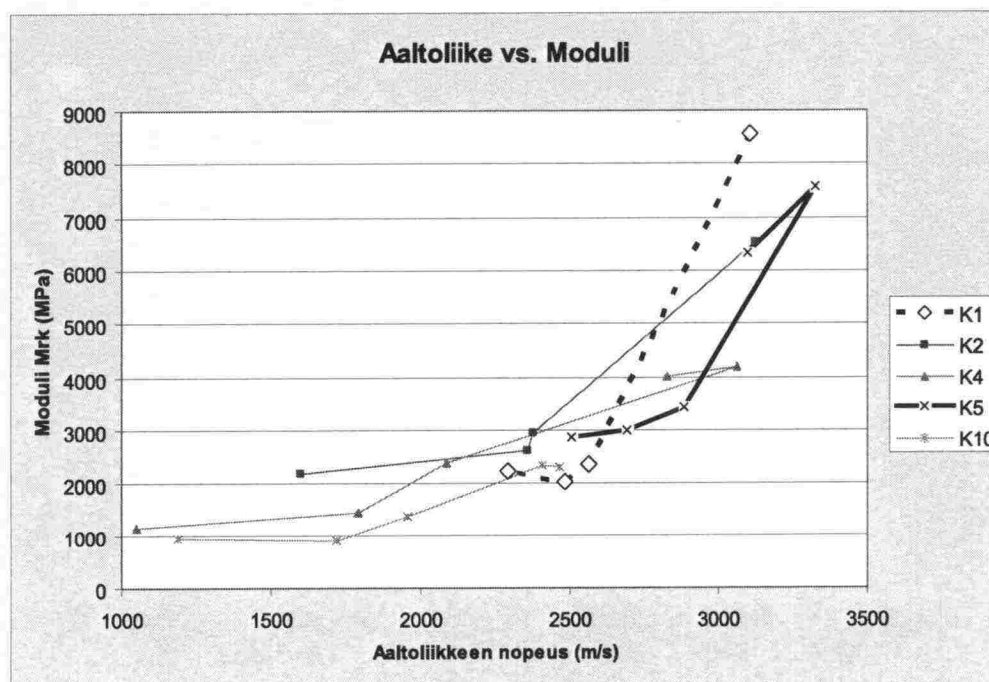
### Jäykkyyden mittaaminen ultraäänellä

Tutkimuksessa kokeiltiin, soveltuuko ultraäänimittaus ainetta rikkomattomana menetelmänä KOST- koekappaleen jäykkyysmoduulin ja pakkasvaurioiden mittaukseen 1-aksiaalisen dynaamisen jäykkyysmoduulikokeen asemasta. Ultraäänimittausta käytetään betonitekniikassa pakkasvaurioiden määrittämismenetelmänä. Kuvassa 19 on verrattu eri kosteustiloissa ja rasitus syklien jälkeen näytteistä mitattua ultraäänin etenemisnopeutta saman näytteen jäykkyysmoduuliin.

Näytteen mahdollinen säröily rasituksen vaikutuksesta näkyy moduulin alenemisena ja ultraäänin etenemisnopeuden hidastumisena. Kuvan 19 mukaan myös alhaisempi moduuli näkyy ultraäänin hidastumisena.

Ultraäänin nopeuteen vaikuttavat näytteen tiiveys, rakeisuus, hienoainespitoisuus, huokoisuus ja vanhennusrasituksen aiheuttama rakenteen löyhtyminen. Kuvan 19 mukaan KOST-näytteestä mitattu ultraäänin nopeus esim. 2500 m/s vastaa jäykkyysmoduulia 3000 MPa.

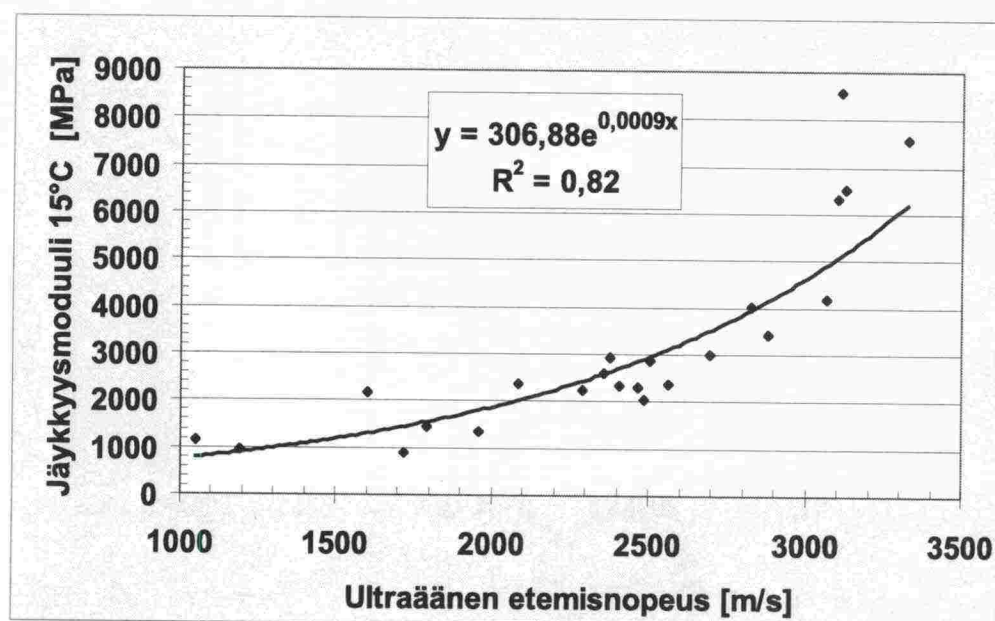
Kuvan 19 yksittäisistä tuloksista on huomattava, että kunkin koostumuksen ehjän näytteen tulokset ovat lähellä kuvan oikeaa reunaa ja eniten vaurioituneiden näytteiden tulokset lähellä kuvan vasenta reunaa.



Kuva 19. KOST-massan moduulin riippuvuus ultraäänen etenemisnopeudesta näytteessä.

Kuvassa 20 on esitetty kaikkien kuvan 19 KOST-koostumusten mittausaineiston yksittäisistä havainnoista ( $n = 23$  kpl) laskettu jäykkyysmoduulin riippuvuus ultraäänen etenemisnopeudesta. Kuvan 20 mukaan moduuli korreloi äänen etenemisnopeuden kanssa (korrelaatiokerroin  $R = 0,90$  ja selityskerroin  $R^2 = 0,82$ ).



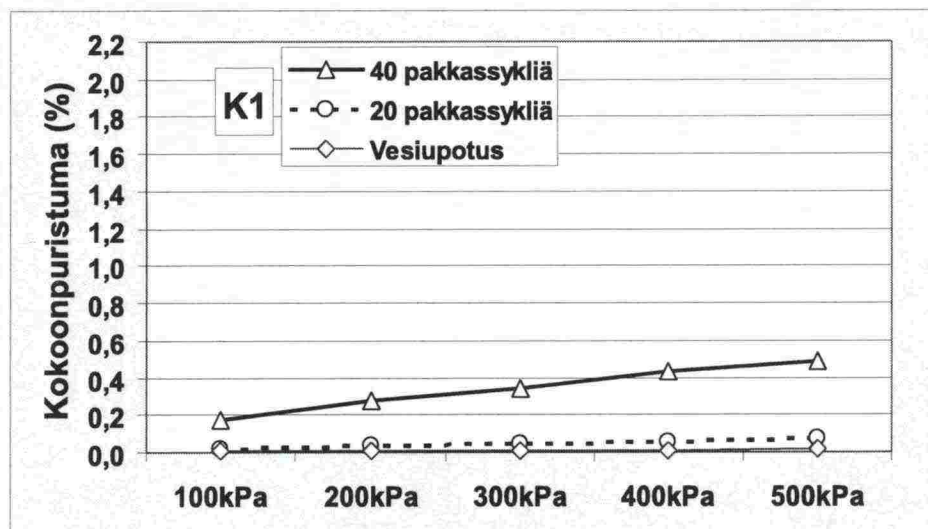


Kuva 20. KOST-massan jäykkyysmoduulin ja ultraäänen etenemisnopeuden välinen korrelaatio.

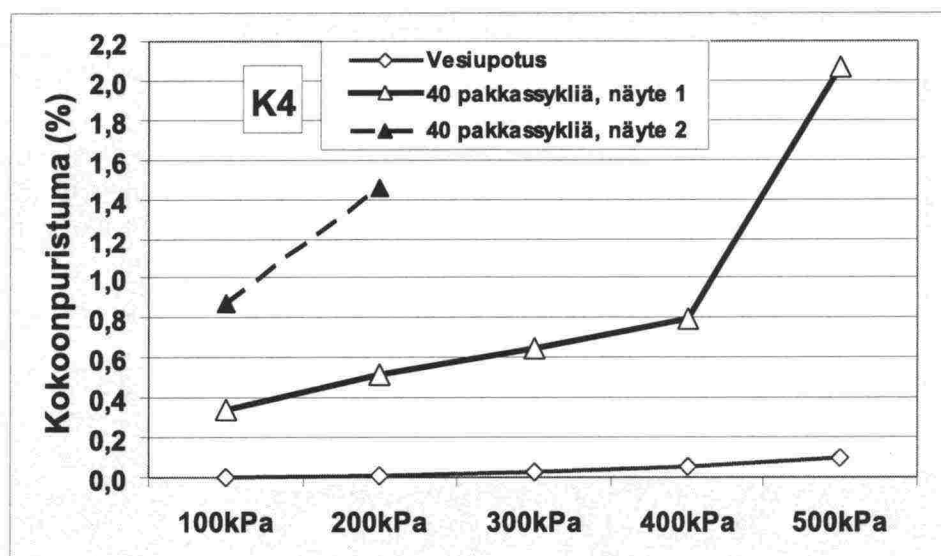
### Deformaatiokestävyyden säilyvyys

Komposiittistabiloinnin tutkittujen koostumusten deformaatiokestävyys vesiupotuksen jälkeen ja moduulin muutos vesiupotuksen ja 20 – 40 jäädytys-sulatussyklin jälkeen on esitetty kuvissa 21-23. Koostumus K1 oli eniten hienoainesta sisältävän koostumuksen A optimi, K5 oli rakeisuuden B optimikoostumus ja K4 oli heikommin tiivistetty rakeisuuden B koostumus.

Sekä rakeisuudella A että B optimikoostumuksen mukaiset KOST-massat säilyttivät hyvin deformaatiokestävyytensä.

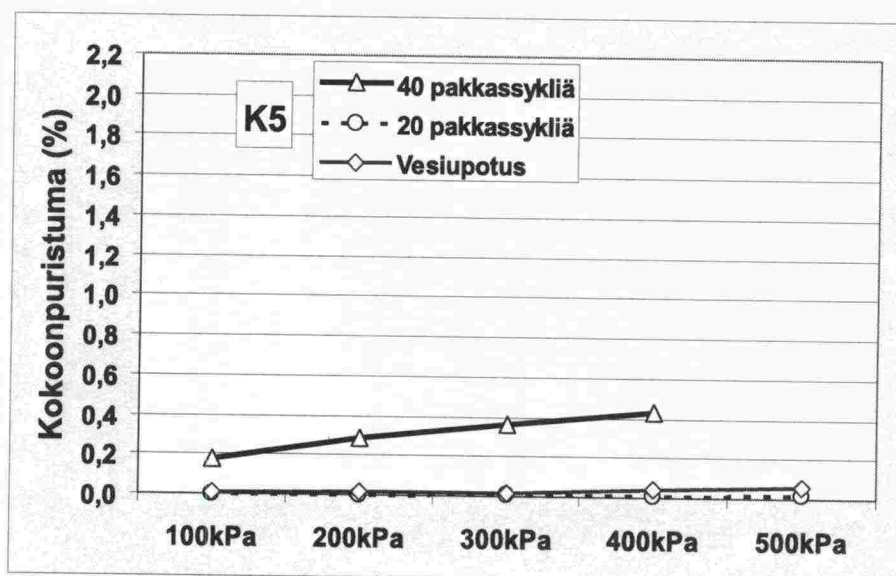


Kuva 21. KOST-massan K1 (rak. A) deformaatiokestävyyden riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä.



Kuva 22. KOST-massan K4 (rak. B, alhainen tiiveys) deformaatiokestävyyden riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä.



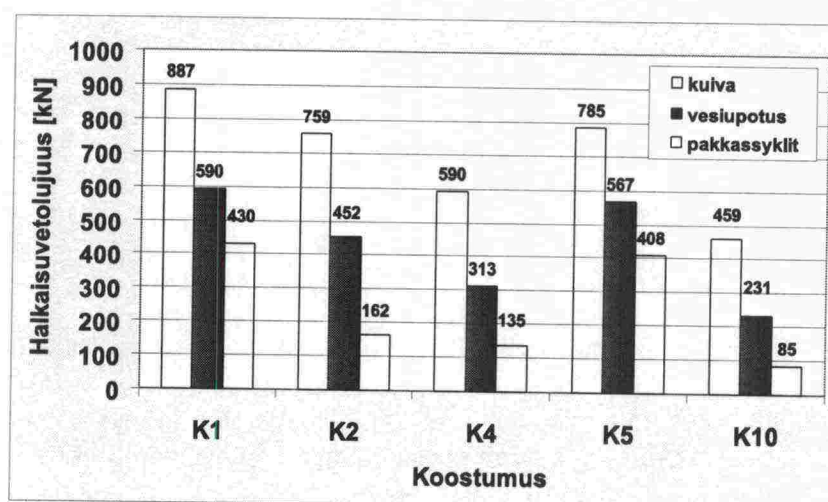


Kuva 23. KOST-massan K5 (rak. B optimi) deformaatiokestävyyden riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä.

### Halkaisuvetolujuuden säilyvyys

Kuvassa 24 on esitetty syklisessä jäykkyysmoduulikokeessa olleiden näytteiden halkaisuvetolujuus pakkassykliä jälkeen ja tulosta on verrattu aiemmin samoilla koostumuksilla tutkittuihin kuivien ja märkien näytteiden halkaisuvetolujuuksiin.

Parhaiten lujuutensa säilytti rakeisuuden B optimikoostumus ja huonoiten rakeisuuden C optimi.



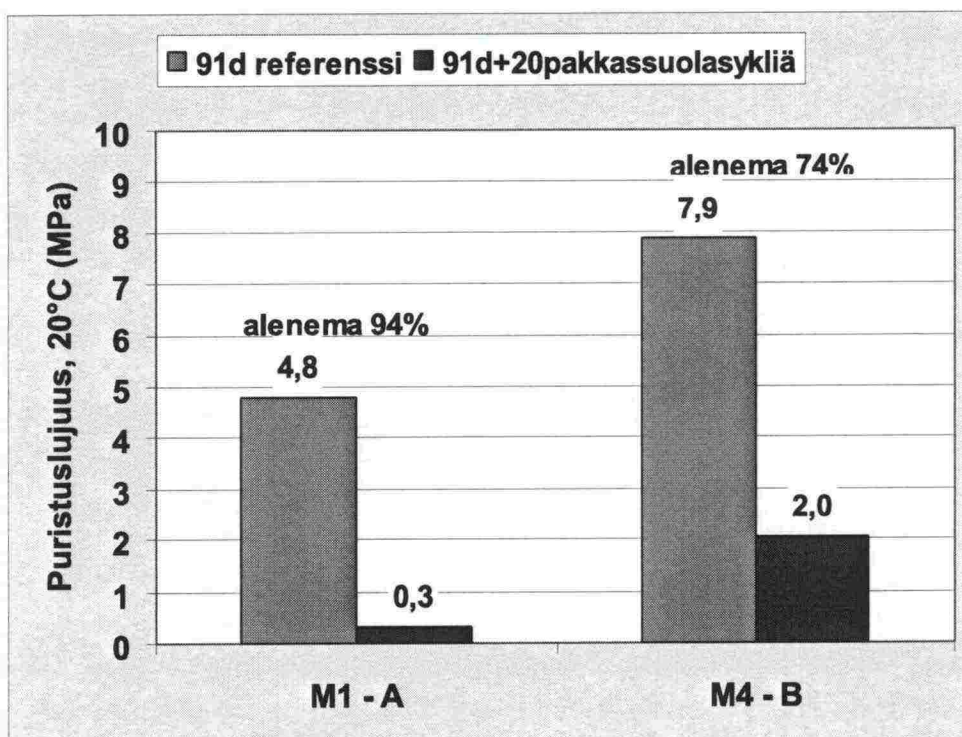
Kuva 24. Halkaisuvetolujuuden säilyvyys vesiupotuksessa ja pakkasrasituksessa (60 jäädytys-sulatussykliä).  
(K1 on A-rakeisuutta, K10 on C-rakeisuutta ja muut B-rakeisuutta)

### 3.4 Masuunihiekkastabilointi

#### Pakkas-suolakestävyys

Kuvassa 25 on esitetty syklisen pakkas-suolakokeen vaikutus MHST-stabiloinnin puristuslujuuteen 20 pakkas-suolasyklin jälkeen. Pakkas-suolarasituksen alkaessa näytteiden ikä oli 91 d. Sekä pakkasrasituksessa olleet että niiden vertailunäytteet koestettiin syklien päättymisen jälkeen saman ikäisinä. Ennen puristusta näytteet kasteltiin vesiupotuksessa.

Masuunihiekkänäytteiden puristuslujuus heikkeni erittäin merkittävästi pakkas-suolakokeessa, kuva 25.



Kuva 25. MHST-stabiloinnin pakkas-suolakestävyys (20 sykliä)  
(MHk 6 % + sem 0,5 %, tiiveys 96 % ICT 200r).

#### Jäykkyysmoduulin säilyvyys

Kuvassa 26 ja taulukossa 7 esitetään MHST-näytteiden jäykkyysmoduuli kosteassa ilmassa säilytyksen, vesiupotuksen ja 20 jäädytys-sulatussyklin jälkeen. Lisäksi yhdellä koostumuksella (M5) tutkittiin viimeisten jäädytys-sulatussykliä päättymisen jälkeen näytteiden jälkilujittumista seuraavan 3 viikon aikana. Syklisessä jäädytys-sulatuskokeessa näytteet jäädytettiin ilmassa ja sulatettiin vedessä.

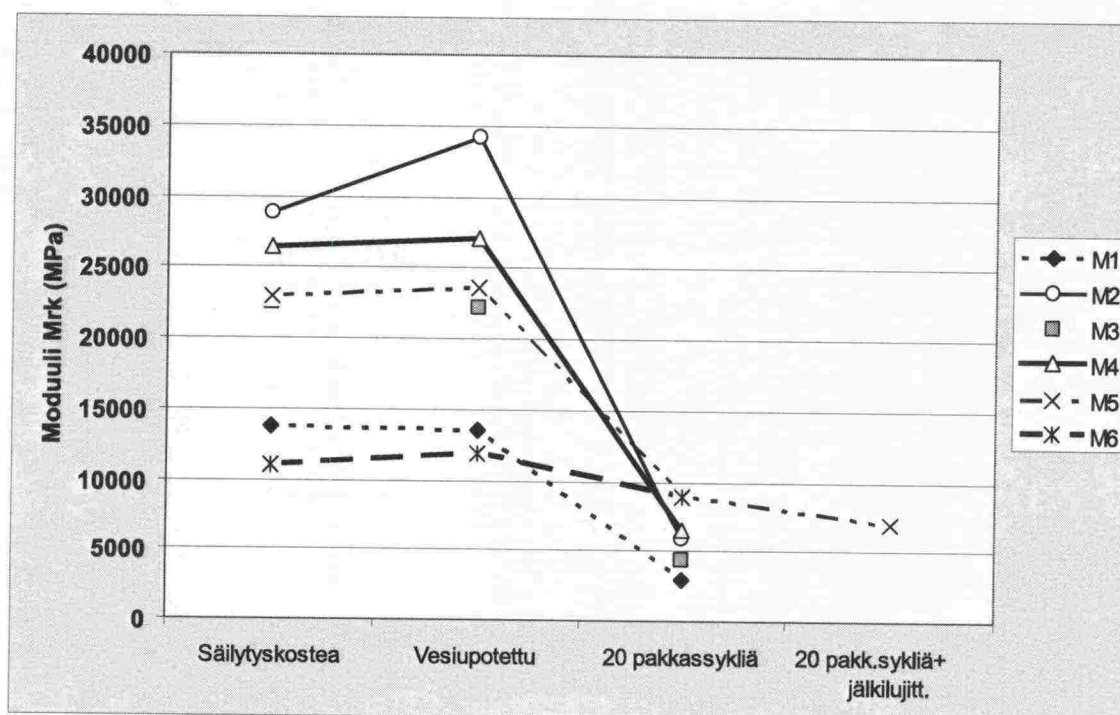
Vesiupotuksen jälkeen (ennen jäädytys-sulatussyklejä) näytteiden jäykkyysmoduuli oli rakeisuuden B mukaisilla massoilla välillä 22000 – 34000 MPa. Jäädytys-sulatussykliä (20 kpl) jälkeen samojen materiaalien jäykkyysmoduuli oli välillä 4400-9100 MPa, kuva 26. Jäykkyyden alenema oli 60 – 80 %, joten materiaali oli muuttunut oleellisesti toisen tyyppiseksi. Jäädytys-sulatussykli-



en jälkeen materiaalin jäykkyys oli huomattavasti lähempänä APASin MHST1-stabiloinnin jäykkyyttä (1800 MPa), kuva 5.

Jäädytys-sulatuskokeessa alentunut jäykkyys ei palautunut, kun näytettä säilytettiin 20 jäädytys-sulatussyklin jälkeen 3 viikkoa kosteassa ilmassa ennen uutta jäykkyyssmoduulikoetta. Tältä osin tulos poikkesi esim. Stabilointiohjeen [3] kuvaamasta MHST:n jälkilujittumistaipumuksesta. Yksittäisen tuloksen perusteella ei kuitenkaan voida tehdä yleisluonteisia johtopäätöksiä jälkilujittumisesta.

Säilytyskosteudessa ja vesiupotuksen jälkeen alhaisin jäykkyys oli rakeisuuden C mukaisella MHST-massalla M6. Sen jäykkyys aleni jäädytys-sulatuskokeessa 24 % eli olennaisesti vähemmän kuin muiden koostumusten jäykkyys. Näin käy usein massoille, jotka ovat jo alun perin heikkoja ja joiden sidokset ovat siksi joustavia.



Kuva 26. MHST-koostumusten jäykkyyssmoduulin riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä.

Taulukko 7. MHST-koostumusten jäykkyyssmoduulin riippuvuus kosteustilasta ja pak-  
kasrasituksen määrästä.

Koostumus	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Rakeisuus	A	B	B	B	B	C
MHk-pitoisuus (%)	6,0	4,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Sementtipit. (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tiiveys (% ICT 200r)	96	96	92	96	96	96
Jäykkyyssmoduuli (MPa)						
Säilytyskosteaa	13823	28833	22487	26477	22975	11051
Vesiupotettu	13589	34257	22192	27135	23602	11872
20 pakkassykliä	2924	5937	4386	6587	9084	8992
20 pakk.sykliä+jälkilujitt.					6998	
Jäykk.moduulin alenema (%) jäädytys-sulatussykliä jälkeen						
Säilytyskosteaa						
Vesiupotettu						
20 pakkasyk./vesiup.	-78	-83	-80	-76	-62	-24
20 sykliä+jälkilujitt./vesiup.					-70	

**Puristuslujuuden säilyvyys**

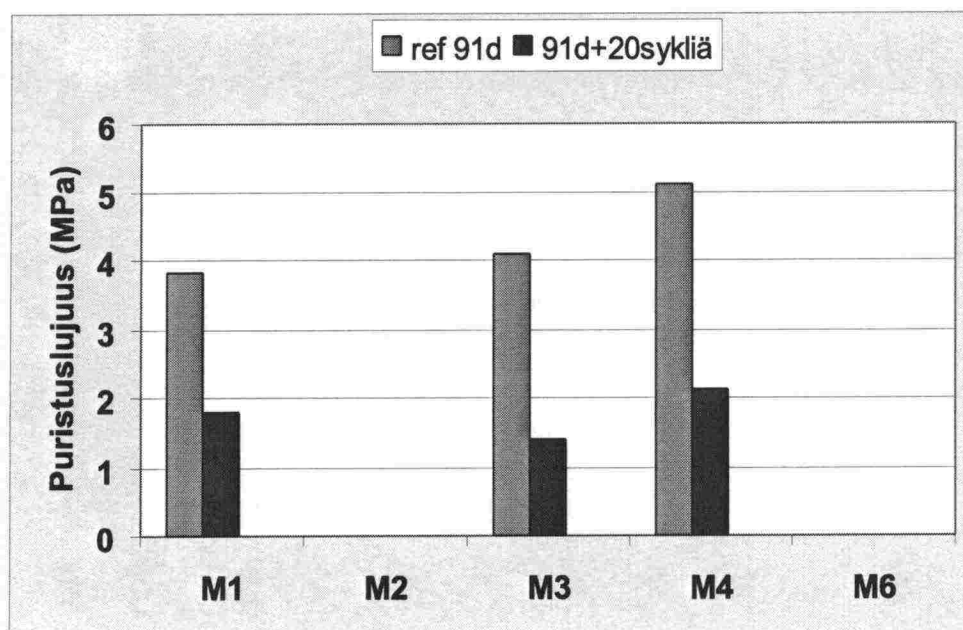
Puristuslujuuden säilyvyyttä jäädytys-sulatusvanhennuksessa tutkittiin kolmella massatyypillä (M1-A, M3 alempi tiiveys ja M4 perusratkaisu). Puristuslujuus aleni 20 jäädytys-sulatussykliä vaikutuksesta seuraavasti (kuva 27):

Koostumus      Lujuuden muutos

M1:              - 53%

M3:              - 52%

M4                - 59%



Kuva 27. MHST-stabiloinnin jäädytys-sulatuskestävyys.

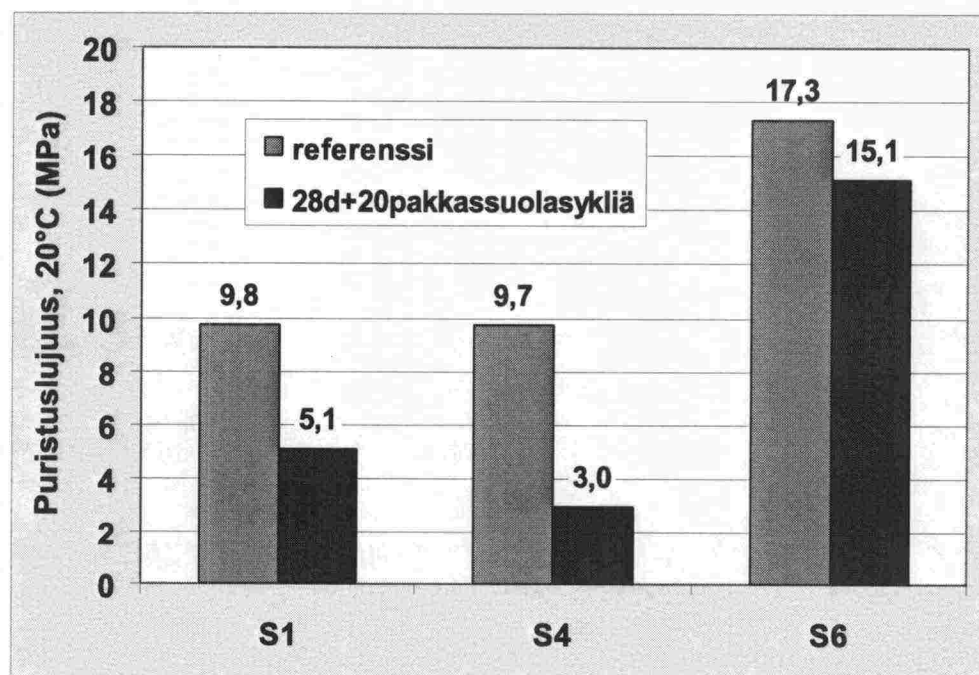


### 3.5 Sementtistabilointi

#### Suola-pakkaskestävyys

Kuvassa 28 on esitetty syklisen pakkas-suolakokeen vaikutus SST-stabiloinnin puristuslujuuteen 20 pakkas-suolasyklin jälkeen. Pakkas-suolarasituksen alkaessa näytteiden ikä oli 28 d. Sekä pakkasrasituksessa olleet että niiden vertailunäytteet koestettiin syklien päättymisen jälkeen saman ikäisinä. Ennen puristusta näytteet kasteltiin vesiupotuksessa, jotta sekä vanhenneet että vanhentamattomat näytteet olisivat likimäärin samassa kosteustilassa.

SST-koostumusten S1 ja S4 puristuslujuus aleni pakkas-suolakokeessa merkittävästi (48 ja 69 %). Korotetulla sementtipitoisuudella (3,5%) valmistettu koostumus säilytti hyvin lujuutensa, mutta sen lujuus ilman vanhennusta oli korkeampi kuin stabilointiohjeen suositus, kuva 28.



Koostumus		S1	S4	S6
Rakeisuus		A	B	B
Sementtipitoisuus	%	2,9	2,0	3,5
Tiiveys	% ICT 200r	96	96	96
Puristuslujuuden alenema (20 pakkassuolasykl.)	%	-48	-69	-13

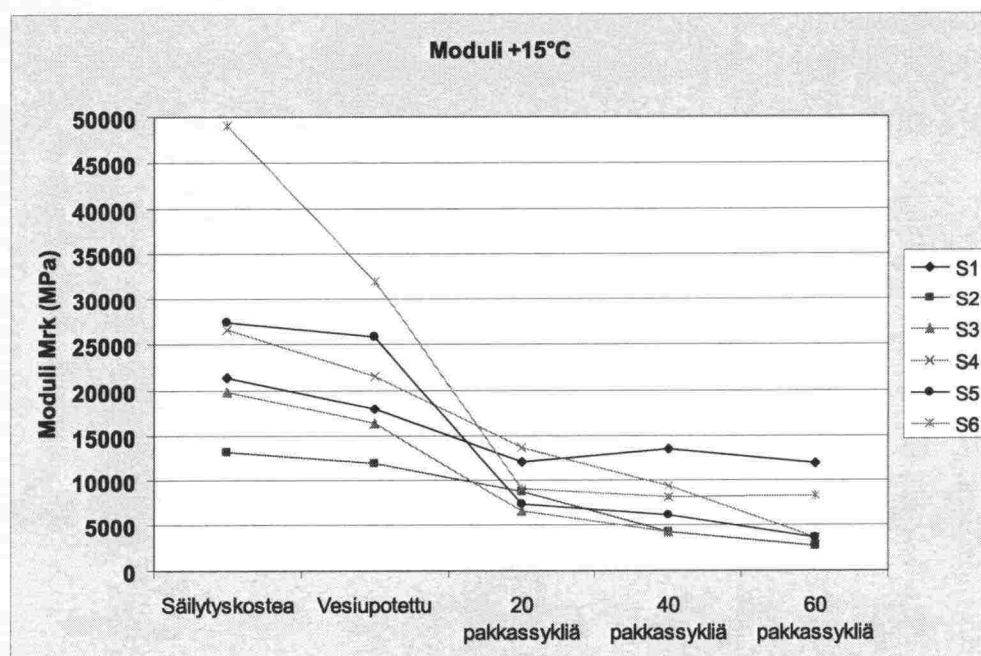
Kuva 28. Sementtistabiloinnin kestävyys syklisessä pakkas-suola-kokeessa.



**Jäykkyysmoduulin säilyvyys**

Sementtistabiloinnin tutkittujen koostumusten jäykkyysmoduuli (15 °C:ssa) varastoinnin jälkeen sekä moduulin muutos vesiupotuksen ja 20 – 60 jäädytys-sulatussyklin jälkeen on esitetty kuvassa 29.

Vähiten aleni rakeisuutta A olevan SST- massan moduuli. Vesiupotuksen jälkeen mitattuun moduuliin verrattuna moduulin alenema 20-60 jäädytys-sulatussyklin jälkeen oli noin 30 %. Muilla koostumuksilla jäykkyyden alenema oli 40 jäädytys-sulatussyklin jälkeen noin 60-80 %, kuva 29, taul. 8.



Kuva 29. SST-koostumusten S1...S6 jäykkyysmoduulit kosteassa ilmassa ja vesiupotuksessa säilytyksen sekä jäädytys-sulatussykliä jälkeen.

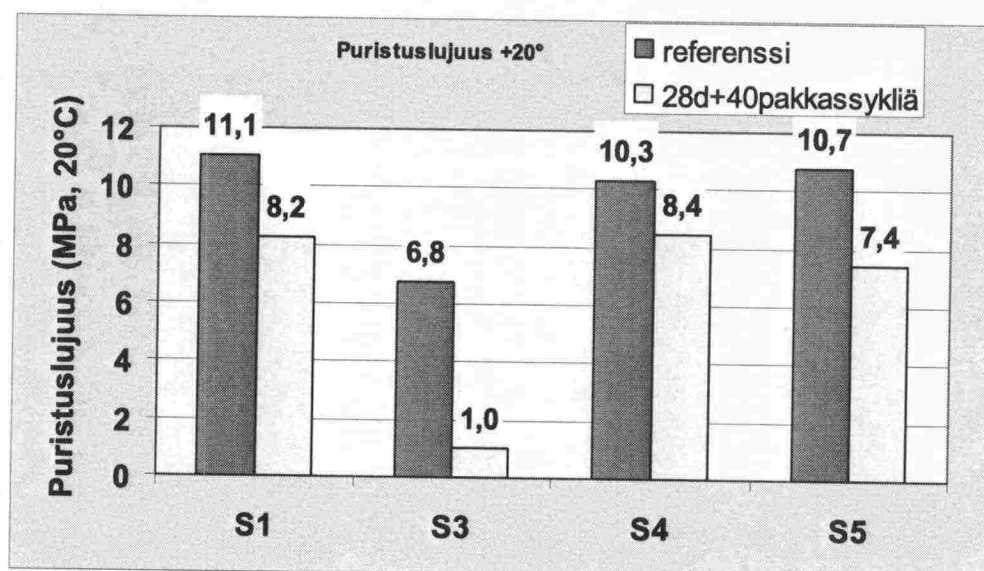
Taulukko 8. SST-koostumusten S1...S6 jäykkyysmoduulit kosteassa ilmassa ja vesiupotuksessa säilytyksen sekä jäädytys-sulatussykliä jälkeen. Moduulin aleneman (%) riippuvuus syklimäärästä.

Koostumus		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Rakeisuus		A	B	B	B	B	B
Sementtipitoisuus	%	2,9	1,6	2,0	2,0	2,0	3,5
Tiiveys	% ICT 200r	96	96	92	96	98,4	96
Jäykkyysmoduuli (MPa, 15°C)							
Säilytyskosteaa	MPa	21382	13224	19764	26579	27420	49113
Vesiupotettu	MPa	17937	11897	16314	21547	25784	32030
20 pakkassykliä	MPa	12131	8829	6640	13701	7414	9124
40 pakkassykliä	MPa	13538	4281	4258	9470	6061	8140
60 pakkassykliä	MPa	11903	2699		3554	3646	8271
Jäykk.moduulin alenema (%) jäädytys-sulatussykliä jälkeen							
20 sykl./vesiup.	%	-32	-26	-59	-36	-71	-72
40 sykl./vesiup.	%	-25	-64	-74	-56	-76	-75
60 sykl./vesiup.	%	-34	-77		-84	-86	-74

### Puristuslujuuden säilyvyys

Puristuslujuuden säilyvyyttä jäädytys-sulatusvanhennuksessa tutkittiin neljällä massatyypillä (S1, S3, S4 ja S5). Puristuslujuus aleni 40 jäädytys-sulatus-syklin vaikutuksesta koostumuksesta riippuen 18...85 %.

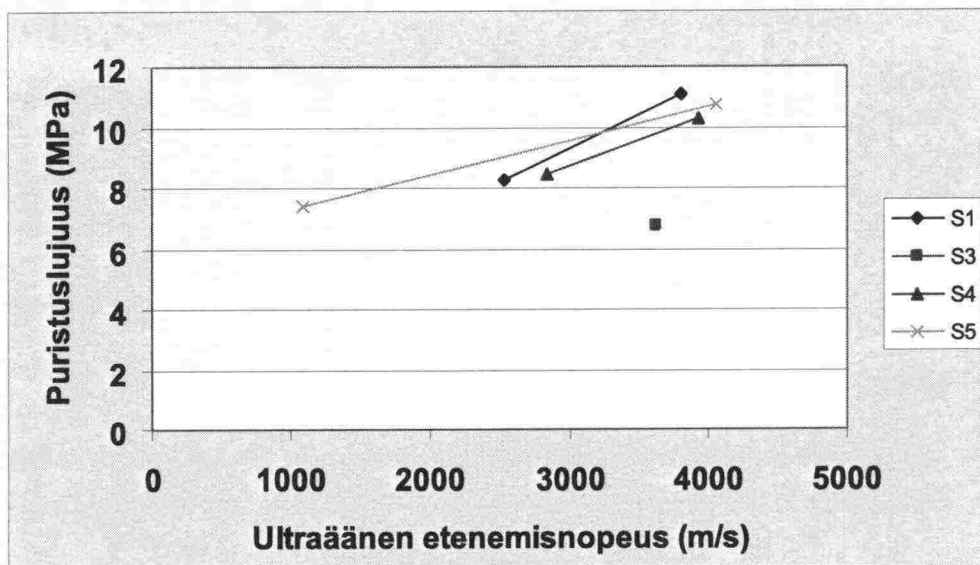
SST-stabiloinnit (S1, S4 ja S5) täyttivät betonirakenteiden jäädytys-sulatus-koevaatimuksen (alenema < 33%) vielä 40 syklin jälkeen. Eniten heikkeni alhaisimman tiiveyden omaava koostumus S3 ja vähiten heikkeni perusvaihtoehto S4, kuva 30.



Koostumus		S1	S3	S4	S5
Rakeisuus		A	B	B	B
Sementtipitoisuus	%	2,9	2,0	2,0	2,0
Tiiveys	% ICT 200r	96	92	96	98,4
Purist.luj. alenema (40 jääd.-sul. sykliä)	%	-26	-85	-18	-31

Kuva 30. SST-stabiloinnin jäädytys-sulatuskestävyys.

SST-näytteiden puristuslujuuden riippuvuus ultraäänen etenemisnopeudesta näytteessä on esitetty kuvassa 31. Alhaisemman tiiveyden omaavan koostumuksen (S3) muista poikkeava tulos näkyy myös kuvassa 31.



Kuva 31. SST-näytteiden puristuslujuus ultraäänen etenemisnopeuden funktiona.



## 4 KÄYTTÖIKÄTARKASTELU

### 4.1 Yleistä

Käyttöikä tarkastelun avulla kuvataan uusien stabilointituotteiden käyttöiän arvioinnin menettelytapa, joka perustuu tuotehyväksynnän yhteydessä tehtyjen laboratoriokokeiden ja koerakenteiden tutkimustuloksiin.

Tässä käyttöikä on rakenteen tai väylän peräkkäisten raskaiden rakenteenparantamistoimenpiteiden väli. Käyttöikä ei ole kunnossapitotoimenpiteiden väli, esim. päällysteiden uusimisväli.

Käyttöiän päähän voidaan tulla, nykyisillä toimivuusvaatimuksilla arvioituna, jos tien pituus- ja poikkisuuntainen epätasaisuus kasvaa haitalliselle tasolle (ajomukavuus, turvallisuus, ...) ja pelkkä kunnossapitotoimenpide ei korjaa ongelmia pidemmällä aikavälillä tai jatkuvasti toistuvien kunnossapitotoimenpiteiden kustannus muodostuu kestämättömäksi.

Stabiloinnin kannalta käyttöikään vaikuttaa stabiloidun kerroksen:

1. Jäykkyys / sitkeys. Stabiloitu kerros on alusta päällysteelle ja se määrää pääosin päällysteen väsymiskestävyyden. Stabiloinnin sitkeys taas määrää rakenteen kestävyys epätasaisia routanousuja ja painumia vastaan.
2. Deformaatiovastus. Stabiloinnin deformaatiovastus määrää pääosan urautumisnopeudesta. Bitumiset päällysteet mukautuvat lähes vaurioitumatta hitaaseen ja rajalliseen urautumiseen.
3. Pysyvyys. Stabiloinnin sisäinen ominaisuus, joka on äärimmäisen tärkeä käyttöiän kannalta. Pysyvyyteen vaikuttaa ylä- ja alapuolinen rakenne, eli veden pääsy kerrokseen, ympäristöolosuhteet ja rasitukset.

Toimivuusvaatimuksiin (URA ja IRI) vaikuttavat stabiloidun kerroksen jäykkyys-, deformaatio- ja pysyvyysominaisuudet. Jos rakenteen mitoitus on tehty hyvin tarkkaan, niin minkä tahansa ominaisuuden muuttuessa alkaa stabiloidun kerroksen ja päällysteen nopeutuva vaurioituminen. Tämän seurauksena syntyy näkyvää uraa ja vaurioita. Kehitys voi tasaantua esim. rakenteen tiivistymisen seurauksena, mutta vaurioitunut rakenne (päällyste + stabilointi) kasutuessaan toistuvasti, jäätyessään ja sulaessaan alkaa todennäköisesti vaurioitua kiihtyvästi. Päällysteen vaurioiden lisääntyessä kohdistuu stabilointiin suuremmat kuormat, jotka puolestaan voivat vaurioittaa stabilointia mekaanisesti. Näillä reunaehdoilla rakenne vaurioituu kiihtyvästi, kunnes se on vaurioitunut niin pahasti (pieniksi yksiköiksi), että se korjataan tai liikennettä rajoitetaan.

### 4.2 Teiden käyttöiän arviointimenetelmät

Teiden käyttöiän arviointimenettelyjä on kuvattu mm. raportissa "Teiden käyttöikäsuunnittelu - lähtökohtia tavoitetilan määrittelyyn", Törnqvist & al. 2007. Alle on poimittu raportista keskeisiä käyttöikää koskevia osuuksia.

Teiden käyttöiän arvioinnin menetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: Kokemukselliseen tietoon, laboratoriokokeisiin ja laskenta-analyyseiin perustuviin menetelmiin:

- Kokemuksellisen tiedon hankinnassa käytetään seurantamittauksia ja muita tutkimuksia olemassa olevilla teillä tai täysimittakaavaisilla koeteillä luonnollisissa olosuhteissa.
- Kokeelliset menetelmät perustuvat vertaileviin laboratoriotestauksiin, joilla pyritään jäljittelemään kokeellisesti materiaalin tai rakenteen turmeltumista luonnollisissa olosuhteissa.
- Laskennalliset menetelmät perustuvat turmeltumisen analyttiseen jäljittelyyn matemaattisin menetelmin.

#### Kokemuksellinen tieto

Kokemukselliseen tietoon perustuviissa käyttöiän arviointimenetelmissä käytetään hyväksi tietoja teiden tosiaikaisesta käyttäytymisestä käyttöolosuhteissa. Tiedon hankinnassa käytetään mm. seuraavia menetelmiä:

- teiden kuntomittaukset ja vauriokartoitukset
- koeteistä saadut kokemukset ja seurantatutkimukset.

Kenttäseurantakokeet ovat kokeellisia tutkimuksia, joissa materiaalien tai rakenteiden pitkäaikaisominaisuuksia tutkitaan luonnon olosuhteissa. Kenttäseurantakokeita voidaan tehdä mm.:

- koeteillä tai
- normaaleilla teillä (in-situ testing).

Molemmilla tavoilla voidaan hankkia luotettavaa tietoa materiaalien ja tuotteiden turmeltumisesta todellisissa olosuhteissa käyttöiän alusta lähtien.

#### Kokeelliset menetelmät

Kokeelliset menetelmät perustuvat yleensä laboratoriossa suoritettaviin kiihdytettyihin rasituskokeisiin. Rasituskokeiden virallisia standardeja on runsaasti käytössä eri maissa. Niitä ei voida kuitenkaan aina käyttää sellaisenaan käyttöiän ennakkointiin. Tähän on useita syitä /Pommersheim & Clifton 1985/:

- Laboratoriokokeissa koekappaleet testataan oleellisesti erilaisissa olosuhteissa todellisiin käyttöoloihin verrattuna.
- Usein kiihdytetty koe muuttaa turmeltumismekanismia siten, että se ei ole enää sama kuin käyttöoloissa.
- Kiihdytetyissä kokeissa yhteys todelliseen aikaan on tuntematon ja todennäköisesti epälineaarinen, vaikka kiihdytetty koe ei muuttaisikaan turmeltumismekanismia.
- Käyttöikään vaikuttavia turmeltumistekijöitä voi olla useita.
- Jos koeolosuhteet ovat vain vähän kiihdyttäviä, tarvitaan herkkiä turmeltumisen seurantamenetelmiä, koska turmeltuminen voi olla vähäistä.
- Jos kokeessa mitattava turmeltuminen on vähäistä, voidaan joutua ekstrapoloimaan kokeen kesto aikaan nähden satoja tai tuhansia kertoja pitempiin aikoihin, mikä johtaa epävarmaan lopputulokseen.

Jotta laboratoriokoetta voitaisiin käyttää käyttöiän ennakkointiin, tulisi ikämäärittelyksen metodiikan olla RILEM-työryhmän ehdottaman mukainen /Masters & Brandt 1987/. Tämä metodiikka on otettu pohjaksi myös ISO-työryhmän työssä /ISO 15686-1 2000/.



Laboratoriossa ja käyttöoloissa tehtyjen kokeiden välille kehitetään matemaattinen yhteys. Tämä yhteys voi olla lineaarinen (turmeltumisnopeuksien suhde), epälineaarinen (esim. eksponenttilauseke) tai muu yhteys. Näiden pohjalta ennakoidaan lopullisesti tuotteen, materiaalin tai rakenteen käyttöikä.

#### Laskennalliset menetelmät

Laskennallisilla menetelmillä tarkoitetaan analogisiin malleihin tai laskentatekniikoihin perustuvia käyttöiän arviointimenetelmiä. Ne eroavat puhtaasti kokeusperäisistä malleista siinä, että niissä on pohjana jokin turmeltumisen teoria, joka osataan kuvata matemaattisesti. Laskennalliset menetelmät ovat yksinkertaisimmillaan jonkin mallikaavan soveltamista. Usein kaavoja on kuitenkin useita ja laskentaproseduuri on niin monimutkainen, että se edellyttää käytännössä tietokoneen käyttöä. Pisimmälle vietynä laskennalliset menetelmät ovat olosuhteiden, rasiusten ja turmeltumisen jäljittelyä mahdollisimman tarkasti luonnollisella tavalla tietokonesimuloinnilla.

Esimerkkinä yksinkertaisesta käyttöiän laskentakaavasta voidaan esittää standardin ISO 15686-1 mukainen mallikaava:

$$ESLC = RSLC \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G \quad (3)$$

missä

ESLC on rakenteen ennakoitu käyttöikä ko. kohteessa,  
RSLC rakenteen käyttöiän vertailuarvo

Muuntokertoimet A...G ottavat huomioon seuraavat tekijät:

A	Materiaalit, laatu
B	Rakenne, suunnittelun yksityiskohdat ja laatu
C	Työn laatu
D	Sisäiset rasitukset
E	Ulkoiset rasitukset
F	Käyttörasitukset
G	Huollon taso

Vertailukäyttöikä RSLC on siis rakenteen käyttöiän eräänlainen 'normaaliarvo'. Suunnittelija muuntaa vertailuiän kohdekohtaiseksi ennakoiduksi käyttöiäksi sen perusteella, mitä hän tietää ko. rakennusosan laatutekijöistä, ympäristösuhteista, käyttörasituksista jne. Tämä tapahtuu muuntokertoimilla A ... G, jotka voivat olla arvoltaan suurempia tai pienempiä kuin 1.



### 4.3 Mahdollisia käyttöiän arviointimenettelyitä

#### Yhdistelmä laboratorio ja kenttäkokeista

Yksi menettelytapa käyttöiän arviointimenettelyn parametrien määrittämiseen on se, että

- uudelle stabiloidulle tuotteelle määritetään laboratoriossa mitoitusominaisuudet (esim. jäykkyys, veden- ja pakkasenkestävyys, ... ) hajontatietoineen,
- mikäli ominaisuudet täyttävät minimivaatimukset tai kattavat vastaavan referenssituotteen ominaisuudet, niin tuotetta testataan pienessä mittakavassa koerakenteessa,
- koerakenteen käyttäytymistä seurataan useita vuosia (esim. 3-5 vuotta) pinnan osalta ja mahdollisesti rakenteesta kantavuusmittauksin (urautumisnopeus ja takaisinlaskettu kerroskohtainen jäykkyys),
- koerakenteesta saadun positiivien kokemuksen perusteella tuotteelle hyväksytään olosuhdekohtainen mitoitusparametrien vaihteluväli, jota käytetään tulevia rakenteita voidaan mitoittaa,
- jos kokemus on negatiivinen, niin tuotteelle voidaan asettaa käytön rajoituksia, merkittäviä rajoituksia ominaisuuksille tai sitä ei hyväksytä käyttöön ollenkaan.

Tämä menettely soveltuu käyttöön uusien stabiloitujen tuotteiden osalta, kun kokemusta tuotteesta (runkoaine/-aineet ja sideaine/-aineet) ei ole, myös Vöyrin täysmittakaavakokeiden pohjalta. Menettely ei edellytä syvällistä turmeltumismekanismien tai paikallisten olosuhteiden hallintaa ja on aikajänteeltään korkeintaan muutaman vuoden pituinen.

Pelkästään kokemusperäisten menetelmien käytössä ongelmat johtuvat lähinnä kokeiden pitkäaikaisuudesta. Kokeet voivat vaatia kymmeniä vuosia ennen kuin niiden pohjalta voidaan tehdä selkeitä päätelmiä materiaalien ikäkäyttäytymisestä. Siksi kokeet saattavat vanhentua tai menettää mielenkiintonsa jo ennen niiden päättymistä. Koetuloksia saadaan vain useita vuosia, kenties vuosikymmeniä, aikaisemmin käytetyistä materiaaleista ja rakentamistekniikoista. Kokeiden pitkäaikaisuudesta saattaa johtua myös tiedon katkoksia ts. tutkijat saattavat vaihtua, tiedot materiaalien ja tuotteiden alkuperästä, ominaisuuksista, kunnossapidosta voivat kadota jne. Lisäksi koetulosten soveltaminen voi olla käytännössä ongelmallista. Koetuloksia voidaan pitää luotettavina ko. materiaalin tai rakenteen suhteen niissä olosuhteissa, joissa testaus on suoritettu, mutta koetulokset eivät ole suoraan siirrettävissä toiseen kohteeseen, jossa olosuhteet tai rakenteet ovat toisenlaiset /Törnqvist & al. 2007/.

### 4.4 Käyttöiän arviointi mitoittamalla

#### Yleistä

Käyttöikämitoitukseen ei Suomessa ole yksikäsitteisiä työkaluja. Vaurioitumisen alkua voidaan arvioida APAS-3 -ohjelmalla, urautumista eli deformaatio-käyttäytymistä – suhteellista – voidaan arvioida vielä keskeneräisellä Tekes –projektissa kehitetyllä deformaatiotyökalulla (Laaksonen & al. 2004). Vaurioitumisnopeutta voidaan tällä hetkellä arvioida vain tilastollisin mallein.



Käyttöikään vaikuttavat stabiloidun kerroksen ominaisuuksien lisäksi ympäristöstä tulevat rasitustekijät: kuormitus, kosteus- ja lämpötila. Päällysrakenteen käyttöikä – aika hallinnollisesti päätetyn toimivuusvaatimuskriteerin toteutumiseen – on myös rakenteen ja pohjamaan funktio. Pohjamaasta johtuvat toistuvat, epätasaiset routanousut rikkovat stabiloidun kerroksen rakenteen ja sidokset ja laskevat siten jäykkyyttä ja jossain määrin deformaatiiovastusta.

### **Väsymismitoitus**

Stabiloidunkin rakenteen käyttöikää – lähinnä vaurioitumisen alkamisaikaa – voidaan arvioida APAS-3 –ohjelmalla. Ohjelmaan voidaan syöttää omat mallit kaikille tuotteille kestoikälaskentaa varten. Jos halutaan laskea päällyste ja stabiloitu kerros yhdessä, niin stabiloidulle tuotteelle on määritettävä väsymisfunktio. TPPT –ohjelmassa määritettiin muutamille tuotteille väsymisfunktio, mutta Infra-Stabil –projektissa niitä ei ole määritetty eikä Suomessa ole tällä hetkellä valmiuksia (esim. AVL –laite) niiden määrittämiseen. Standardimenetely on olemassa, mutta sitä ei liene käytetty Suomessa tähän mennessä.

Vertailtaessa alempiluokkaisten teiden erityyppisillä stabiloiduilla kantavan kerroksen yläosilla (100 mm paksu) toteutettuja rakenteita, voidaan todeta, että kaikilla materiaaleilla kestoikä (väsymisen kautta) on riittävän suuri ja erot massatyypien välillä pienet. Sitomattomaan vaihtoehtoon nähden kestoikat kasvavat yleensä merkittävästi, jos rakenne muuten on kunnossa. Sitomat-  
tomilla rakenteilla kestoikä määräytyy yleensä rakennekerrosten pystysuoran muodonmuutoksen kautta.

Väsymismitoituksessa stabiloidun kerroksen jäykkyys on valittava vastaamaan tilannetta vuosien päässä alkutilasta. Tämä tehdään käyttäen yllä kuvattua mitoitusparametrien valintamenettelyä. Olosuhteilla, esim. pohjamaan laadulla (routimaton/routiva) tulee olla vaikutusta sallittuihin mitoitusparametreihin. APAS-3 ei tue periodimitoitusta, joten esim. jäykkyyden muutosta ajassa ei voi kuvata eikä käyttää laskennassa. Tällöin laskenta tulee tehdä oletetun heikoimman tilanteen mukaan.

### **Deformaatiomitoitus**

Rakenteen suhteellista deformaatiokäyttäytymistä voidaan arvioida Tekes –projektissa tuotetun deformaation laskentatyökalun avulla. Työkalu soveltuu tällä hetkellä vain sitomattomien kerrosten deformaation arvioimiseen ja sen verifiointi on kesken. Työkaluun voidaan syöttää uusienkin materiaalien deformaatiofunktioita.

Infra-Stabil –projektissa määritettyjen deformaatio-ominaisuuksien (VBST, REST, KOST ja MHST) erot ovat selvät. Pääosin erot johtuvat massatyypien käyttäytymisestä, mutta osin myös käytetystä koetekniikasta. Kokeet toteutettiin yksi-ulotteisina syklisinä kuormituskokeina. Tällöin vaakamuodonmuutosta vastustava jännitys (vaakajännitys) oli nolla ja leikkausjännityksen johdosta erityisesti VBST –massa ja MHST –massa deformoitui-  
vat merkittävästi jo varsin pienillä pystyjännityksen arvoilla. Tämä asia on korjattava tulevaisuudessa siirtymällä kolmiakselitekniikkaan ja käyttämällä esim. 50 kPa sellipainetta (tai vastaavaa alipainetta, vrt. SFS-EN 13108-20) näytteen tukemiseen ja tie-  
rakennetta vastaavan olosuhteen luomiseen.

Massatyypit voi urautumisnopeuden osalta järjestää suhteelliseen järjestykseen tehtyjen deformaatiokokeiden vasteen mukaan. Kokeiden pohjalta KOST –massan deformaatio voidaan olettaa lähes merkityksettömäksi ja muidenkin massojen deformaatioherkkyys on pienempi kuin sitomattomalla sora-/kalliomurskeella.

### Vaurioitumisnopeus

Vaurioitumisnopeuden arvioimiseen ei ole käytettävissä vaurioitumismalleihin pohjautuvaa työkalua tai ohjelmistoa, joskin niitä pyritään kehittämään kansainvälisesti laajassa mitassa. Tilastollisin menetelmin on kuitenkin luotu joukko ennustemalleja, joita voi käyttää sellaisenaan tai tarkennettuna.

### 4.5 Esimerkki käyttöikä tarkastelusta

Seuraavat esimerkit kuvaavat mahdollisuuksia tehdä käyttöikämitoitus tai mahdollisuuksia mitoittaa rakenne tietyllä kesto-/käyttöiälle. Esimerkkien tulokset ovat vain suuntaa antavia. Kestoikää on tarkasteltu väsymiskestävyyden ja käyttöikää urautumisnopeuden kannalta, mutta vaurioitumisnopeutta ei ole käsitelty.

#### Kohde

Käyttöiän erilaisia määritysmenetelmiä on tarkasteltu käyttäen rakenteena Vöyrin täysmittakaavakokeen keskimääräistä rakennetta. Laskennoissa käytetty rakenne käsittää seuraavat osat pinnalta pohjamaahan: päällyste PAB-V (50 mm), stabiloitu kantava (100 mm), kantavan murske (50 mm), jakava sora (150 mm), suodatinhiekkä (250 mm), sora (400 mm) ja pohjamaana savi.. Koko rakennetun tien paksuus on yhteensä 1000 mm. Kaikki muut rakenteen osat, paitsi stabiloitu kantava kerros, olivat tarkasteluissa vakioita (kerrospaksuus, jäykkyys, Poisson -luku, jne.). Stabiloitu kerros ei sisällä väsymismallia, koska niitä ei ole määritetty näille stabiloiduille massoille.

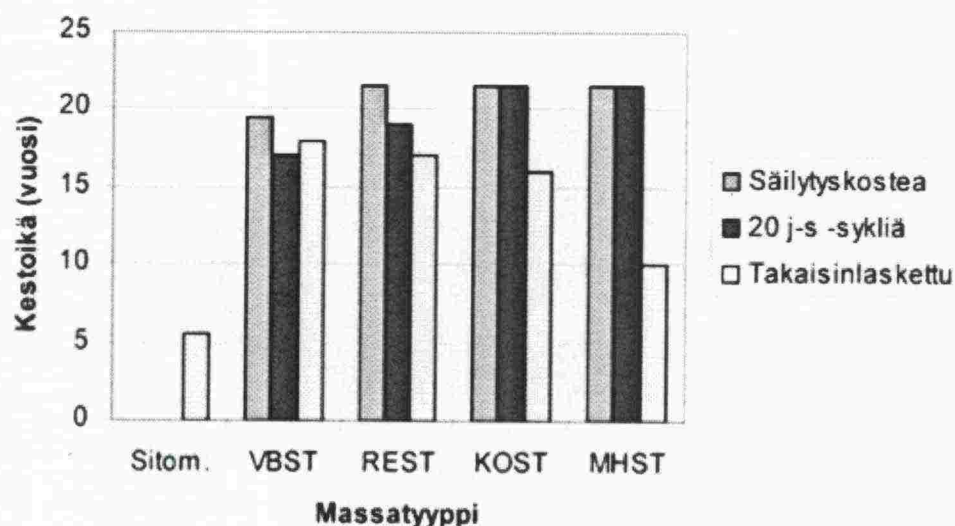
### Väsymiskestävyys

Väsymiskestävyysvertailu tehtiin kolmessa portaassa niin, että rakenteelle määritettiin keskimääräinen ikä väsymisvaurion alkuun laboriokokeilla 1) heti 30d - 90d säilytyksen jälkeen ja 2) sen jälkeisten 20 jäädytys-sulatus -syklien jälkeen määritetyillä jäykkyysmoduulien arvoilla. Viimeinen 3) ikä määritettiin Vöyrin täysmittakaavakokeen eri stabilointityyppien 100 mm rakenteista takaisinlasketuilla jäykkyysmoduuliarvoilla. Laskelmissa käytetyt jäykkyysmoduulit on koottu taulukkoon 9 ja tulokset on esitetty kuvassa 32. Kuvan tulokset ovat laskentatapauksien 1 ja 2 osalta lähinnä suuntaa-antavia, koska laboriokokeet tehtiin täysin eri materiaalilla. Ikä väsymisvaurion alkuun, eli kestoikä kuvassa 32 on APAS -3 -ohjelmiston antama alin ikä mille tahansa rakenteen osalle, ei siis välttämättä päällysteen vaurioitumisesta johtuva kestoikä. Tavoitteelliseen ehjän rakenteen ikään päästään säätämällä kerrospaksuuksia ja/tai kerroskohtaisia ominaisuuksia.



Taulukko 9. Kestoikälaskelmissa käytetyt stabiloidun kantavan kerroksen jäykkyysmoduulit.

Materiaalityyppi	Jäykkyysmoduuli (MPa) APAS 3 -laskelmissa		
	Säilytyskostea	20 jäädytys-sulatussykliä	Takaisinlaskettu
Sitom.			280
VBST	1500	1250	950
REST	2000	1500	1250
KOST	7000	3500	1150
MHST	8000	5000	600



Kuva 32. APAS-3 -ohjelmalla määritetyt eri kestoiät Vöyrin täysmittakaavakohteen rakenteelle ja eri tyyppisille stabiloidun kantavan kerroksen materiaaleille. Päällysteen väsymiskesto on kaikilla rakenteilla sama 21.5 vuotta.

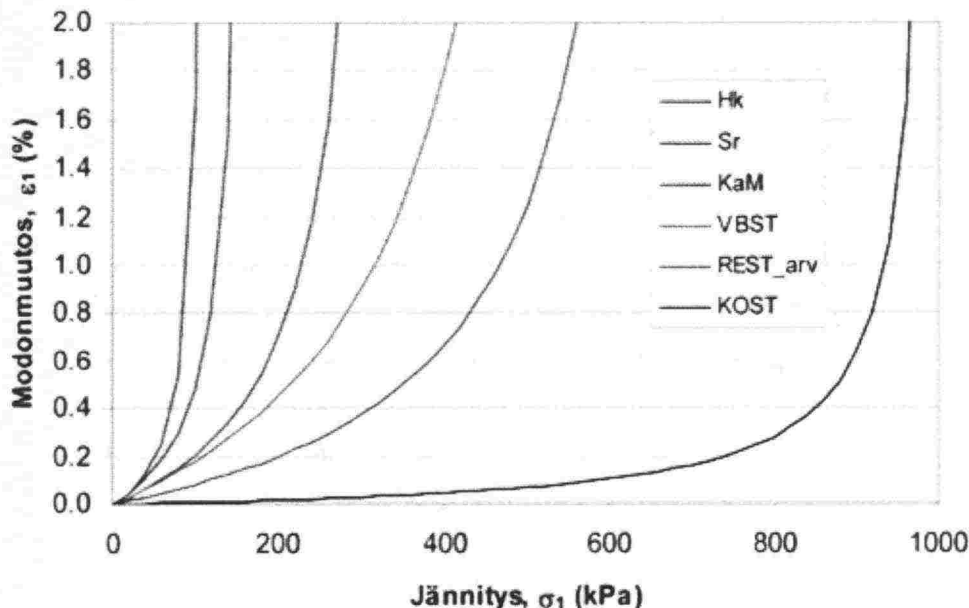
### Deformaatiokestävyys

Deformaatiokestävyysvertailu tehtiin vain yhdellä rakenteella ja yksillä materiaaliominaisuuksilla. Laskentatapaus käsitti vain säilytyskosteille näytteille tehtyjen kokeiden tuloksista määritetyn deformaatiovastustilan. Näin siksi, että VBST -massalla ei saatu riittävästi tuloksia 20 jäädytys-sulatus -sykliä jälkeen ja toisaalta koska KOST -massalla 20 jäädytys-sulatus -syklin vaikutus oli varsin pieni.

Deformaatiotyökalun lähtötiedot voitiin kokeiden perusteella määrittää vain VBST ja KOST -massoille. Muille massoille ei yhdellä, moniportaisella yksiaksiaalisella kuormituksella toteutettuja deformaatiokokeita tehty. Koska stabiloiduille materiaaleille ei ole määritetty lujuusominaisuuksia kolmiakselikokeella, niin lujuusominaisuudet jouduttiin arvioimaan. Näiden arvioitujen ominaisuuksien avulla määritettiin sitten deformaatiomallin tarvitsemat yhteydet ( $\sigma_1 - \epsilon_1 P$ ). Peräkkäisistä arvioinneista johtuen yhteys ei ole tarkka, vaan lähinnä suuruusluokalleen oikein. Riittäväillä materiaalikokeilla yhteydestä voidaan kui-

tenkin tehdä tarkka. Tähän tarvitaan lujuusominaisuudet kolmiakselikoesarjasta ja deformaatiokoe mielellään kolmiakselisessa jännitystilassa tehtynä. Kuvassa 33 on esitetty stabiloidun materiaalin pystysuuntainen pysyvä muodonmuutos ( $\epsilon_{1p}$ ) 105 syklin jälkeen pystysuoran jännityspulssi -tason funktiona.

Kuvassa 33 on esitetty myös REST -massalle luotu yhteys, joka perustuu arvioon.

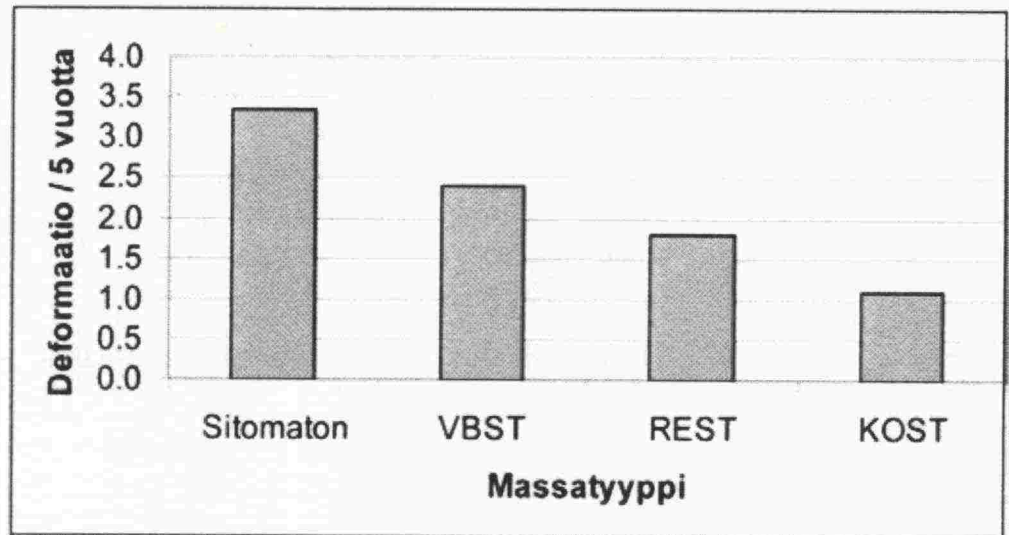


Kuva 33. Deformaatiotyökalun käyttämä yhteys materiaaliin vaikuttavan pystysuoran jännityspulssin aiheuttamasta pystysuorasta kokoonpuristumasta 100 000 syklin jälkeen.

Myös deformaatiotarkastelussa kaikki muut kerroskohtaiset ominaisuudet olivat laskennan alussa vakioita, paitsi stabiloidun kerroksen jäykkyysominaisuudet. Työkalu kuitenkin iteroi jännitystilaa ja materiaalikerrosten jäykkyyksiä rakenteessa, ja jäykempi kantava kerros laskee alaosan jännityksiä, pienentäen näin pystyjännityksiä ja samalla pystysuoria muodonmuutoksia eli deformaatiota.

Rakenteen urautuminen viiden vuoden aikana on esitetty kuvassa 34 kolmelle massatyypille VBST, REST ja KOST. Vertailuna toimii sitomattomalla kalliomurskeella toteutettu kantavan kerroksen rakenne. Ehjän MHST -massalla toteutetun rakenteen tulos vastaa tai alittaa KOST -massalla toteutuvan urautumisen. Kaikkien tarkasteluiden osalta voidaan sanoa, että käytetty yksinkertainen deformaatiomalli aliarvioi deformaation määrän. Mallia voidaan tarkentaa, mutta se edellyttää työkalujen jännitysten laskentamenetelmien kehittämistä.





Kuva 34. Deformaatiotyökalun tuottama urautumiskuvaaja, kun stabiloidun kanta-  
van kerroksen materiaali on VBST, REST ja KOST. Liikennemäärä vastaa  
Mt718:n (Vöyri) todellisia liikennemääriä. KVL = 1000 ja KVL\_R = 100 ajon/  
vrk.

### Kerroinmenettely

#### Käyttöiän kokeellinen määrittäminen samankaltaisen vertailutuotteen avulla

Käyttöikälaskelmissa tarvitaan tieto käyttö- ja laboratorio-olosuhteiden eron vaikutuksesta käyttöikään. Tätä eroa kuvataan shift factor -korjauskertoimella. Se voidaan määrittää tunnetulle tuotteelle käyttöolosuhteissa määritetyn käyttöiän ja laboratoriossa mitatun säilyvyysparametrin suhteena.

Tutkitavan tuotteen käyttöikä määritetään suhteessa vertailumateriaalin käyttöikään. Molemmista tuotteista tutkitaan käyttöikäominaisuudet laboratoriossa. Laboratoriokokeissa voidaan määrittää esim. veden ja pakkasen rasitusmäärän vaikutus jäykkyysmoduulin muuttumiseen tai deformaatio-kestävyyden muuttumiseen ajan funktiona.

Vaihtoehtoiselle uudelle tuotteelle voidaan suhteellisen yksinkertaisesti määrittää säilyvyysparametrejä laboratoriossa. Sen sijaan täysin uuden tuotteen käyttöiän selvittäminen käyttöolosuhteissa edellyttää yleensä pitkäaikaista, monia vuosia kestävästä seuranta. Jos vaihtoehtoinen tuote on samankaltainen (esim. sama bituminen sideaine) kuin tunnettu tuote, voidaan olettaa, että molempien shift factor -kerroin on likimäärin yhtä suuri. Tällöin voidaan vaihtoehtoisen tuotteen suhteellinen käyttöikä laskea kaavalla 4.

$$T_{K2} \approx A_1 \times T_{L2} \quad (4)$$

jossa

TK2 on vaihtoehtoisen tuotteen käyttöikä käyttöolosuhteissa,  
TL2 vaihtoehtoisen tuotteen käyttöikä laboratorio-olosuhteissa,  
A1 tunnetun vertailutuotteen käyttöolosuhteissa määritetyn käyttöiän  
ja laboratoriossa mitatun käyttöiän suhde (shift factor).



Kerros A1 muodostuu yleensä useiden säilyvyysominaisuuksien (pakkaneen, vesi yms.) yhteisvaikutuksesta. Kullekin toimivuusvaatimukselle voi olla erilainen shift factor -kerros. Osatekijöiden yhteisvaikutus lasketaan kaavalla 5.

$$A_1 = A_{A1} \times A_{B1} \times A_{C1} \times \dots \times A_{N1} \quad (5)$$

jossa AA1, AB2...AN1 ovat tunnetun tuotteen shift factor-kertoimen eri säilyvyysominaisuuksien perusteella määritettyjä osakertoimia.

Kertoimet AA1 ---ANm on laskettava vertailutuotteille analyttisesti tai tilastollisesti materiaali- ja rakennemalleilla tai määritettävä pitkäaikaisilla seurannoilla hyvin tunnetuille rakenteille. Tällä hetkellä näitä kertoimia ei ole määritetty. Jos tämä menetelmä halutaan ottaa käyttöön, niin kertoimien tärkeys ja arvo on määritettävä.

## 5 STABILOINTIEN TUOTEHYVÄKSYNTÄ

Projektin tutkimusten avulla on kerätty referenssiaineisto, jota voidaan käyttää vertailtaessa mahdollisten uusien stabilointituotteiden toiminnallisia ominaisuuksia tavanomaisten työselitysten mukaisten stabilointien ominaisuuksiin. Merkkituotestabiloinnin reseptitieto on salaista eikä sitä merkitä tuotehyväksyntätutkimuksen raporttiin. Tuotehyväksyntää varten tutkimuslaitos tekee uuden tuotteen edustajan toimeksiannosta tuotehyväksyntätutkimuksen, jossa selvitetään uuden tuotteen säilyvyyden ominaisuuksia.

Jos uusi tuote sisältää bitumia, tutkitaan jäykkyyssmoduulin ja deformaatiokestävyyden säilyvyys syklisessä jäädytys-sulatuskokeessa. Lisäksi selvitetään jäykkyyden ja deformaatiokestävyyden säilyvyyden herkkyys sideaine tai tiiveyspoikkeamille.

Jos stabilointi ei sisällä bitumia, tehdään syklisen deformaatiokokeen asemasta syklisiä lujuuskokeita.

Uutta tuotetta verrataan sitä lähinnä vastaavan referenssistabilointimassan vastaaviin ominaisuuksiin. Referenssistabilointityyppejä ovat Tiehallinnon stabilointiohjeen mukaiset VBST-, KOST-, MHST- tai SST-stabiloinnit, joista kunakin merkkituotestabiloinnin referenssimateriaaliksi valitaan se, jonka sideaine on lähinnä tutkittavan merkkituotteen sideainetta.

Toistaiseksi ei ole sovittu, mikä taho tai viranomainen tekee uuden stabilointituotteen tuotehyväksyntäpäätöksen. Niin kauan kuin ei muuta ole päätetty, yleisille teille käytettäväksi hyväksytyille uusille tuotteille voi antaa hyväksynnän Tiehallinto.

Pohjoismaiden tiehallinnot voivat myös keskenään sopia, että yhdessä Pohjoismaassa hyväksytty tuote hyväksytään myös muussa Pohjoismaassa. Projektin puitteissa on keskusteltu tällaisen menettelyn käyttöön otosta Ruotsin ja Norjan tielaitosten edustajien kanssa. Vastaanotto on ollut varovaisen myönteinen tällaiselle yhteiselle hyväksynnälle, vaikka asiasta ei ole mitään päätöksiä tehtykään. (Viite: Rainer Laaksosen muistio neuvotteluista Trondheimissä 27.-29.6.2005, läsnä Ruotsista Anders Huvstig ja Tomas Winerholt sekä Norjasta Leif Bakløkk, Øystein Myhre ja Torbjørn Jørgensen).

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Käyttöikämitoitukseen ei vielä ole Suomessa yksikäsitteisiä työkaluja. Vaurioitumisen alkua voidaan arvioida APAS-3 -ohjelmalla ja urautumista voidaan arvioida deformaatiotyökalun tämän hetkiseläkin versiolla. Molempia työkaluja voidaan edelleen kehittää sekä laskentateknisesti että materiaalimallien ja materiaalitietojen osalta. Vaurioitumisnopeutta voidaan tällä hetkellä arvioida vain tilastollisin mallein.

Pituussuuntainen epätasaisuus, silloin kun se johtuu stabiloidusta kerroksesta, aiheutuu lähinnä tuotantotekniikan aiheuttamasta hajonnasta, eikä sitä ole tarkasteltu tässä työssä. Käyttöikämitoitukseen siirtyminen edellyttää dokumentoitua tietoa olemassa olevien rakenteiden käyttöiästä ja rakenteista, materiaaleista sekä toimenpidehistoriasta.

Projektin tutkimusten avulla kerättyä referenssiaineisto voidaan käyttää vertailtaessa mahdollisten uusien stabilointituotteiden toiminnallisia ominaisuuksia tavanomaisten työselitysten mukaisten stabilointien ominaisuuksiin.

Tutkimuksen tulosten perusteella on stabiloitujen materiaalien ominaisuuksien säilyvyydestä tehty seuraavia johtopäätöksiä:

- pakkas-suolarasitus ja jäädytys-sulatusrasitus vaikuttavat merkittävästi stabilointinäytteiden lujuutta ja jäykkyyttä alentavasti. Vanhennetun ja vanhentamattoman näytteen jäykkyyshmoduuli ovat niin paljon toisistaan poikkeavia, että käytettävä moduuli tulee valita käyttötilan todellisten rasitusten mukaan. Moduulia valittaessa on ratkaisevaa, pääseekö stabilointi jäätmään märkänä ja joutuuko se alttiiksi pakkas-suolarasitukselle
- jos muutetaan mitoitusmoduulia, tulisi myös väsymiskestävyys tarkistaa. Pakkas-suolarasituksen ja jäädytys-sulatusrasituksen vaikutuksesta väsymisominaisuuksiin ei kuitenkaan ole tutkittua tietoa ja tästä aiheutuu laskelmiin epätarkkuutta,
- suhteituksen ja ennakkokokeiden ja hyvin suoritettun tiivistämisen vaikutukset stabiloinnin laatuun ovat merkittäviä. Paikalla rakentamisessa ei käytännössä ole aikaa tai mahdollisuutta tehdä laajoja suhteituskokeita jatkuvasti vaihtuville tielinjan materiaaleille. Tehty tutkimus antaa tähän tilanteeseen myös työmaille käyttökelpoisia suuntaviivoja koostumusten muutosten vaikutuksesta stabilointimassojen ominaisuuksiin.



## 7 KIRJALLISUUSVIITTEET

- [1] Laukkanen, K., Laaksonen, R., Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämistutkimus. Espoo 2007, Infra-teknologiaohjelma, INFRA-STABIL-projekti, Tiehallinnon selvityksiä 44/2007.
- [2] Tien kerrosstabilointien käyttöiän arviointi ja tuotehyväksyntäperusteet, julkaisematon luonnos, 11.6.2004
- [3] Stabilointiohje (koekäytössä), Helsinki 2002. TIEH 2100009-02.
- [4] Vesikari, E., Rautiainen, R., Häkkä-Rönnholm, E., Silvennoinen, K., Salonvaara, M., Viitanen, H., Julkisivujen ja katteiden käyttöiän ennakointi. Espoo 2001, VTT Julkaisuja 850.
- [5] ISO 15686-1:2000. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles. 41 s.
- [6] Betoninormit 2004. Jyväskylä 2004, Suomen betoniyhdistys, b50.
- [7] Standardi ISO 15686-1
- [8] Törnqvist, J. & al. 2007. Julkaisematon luonnosraportti, VTT-R-09486. Teiden käyttöikäsuunnittelu – lähtökohtia tavoitetilan määrittelyyn. 62 s. + liitteet.
- [9] Pommersmith, J. & Clifton, J., 1985. Prediction of concrete service-life. Materials and Structures. Vol. 18, Nr. 1, Jan. 1985, ss 21-30.
- [10] Masters, L.W. & Brandt, E., CIB W80/RILEM 71-PSL 1987. Prediction of service life of building materials and components. Materials and Structures, Vol 20, Nr 1, Jan. 1987. ss 55-77.
- [11] Laaksonen, R & al. 2004. Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa, Deformaation laskentatyökalun kehittäminen. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004. Helsinki 2004. 63 s. + liitteitä.
- [12] SFS-EN 13108-20. Asfalttimassat. Materiaalivaatimukset. Osa 20: Tyypit testaus. Bituminous mixtures. Material specifications. Part 20: Type testing.

## 8 LIITTEET

Kiviaineksen rakeisuustavoite	Liite 1
Referenssistabilointimassojen rakeisuus A ("Teiskon" hienoaines)	Liite 2
Referenssistabilointimassojen rakeisuus B ("Teiskon" hienoaines)	Liite 3
Referenssistabilointimassojen rakeisuus C	Liite 4
Referenssistabilointimassojen rakeisuus A	Liite 5
Referenssistabilointimassojen rakeisuus B	Liite 6
Referenssistabilointimassojen rakeisuus C	Liite 7



Stabilointien kehittämistutkimuksen laboratoriokokeissa käytettävän referenssimassan kiviaineksen rakeisuuden ohjekäyrät on esitetty kuvassa 36, joka on muokattu Asfalttinormien 2000 lisälehden 2003 rakeisuuskuvien 29 ja 30 perusteella. Se poikkeaa lisälehden kuvista mm. siten, että ohjealueen ylin rajakäyrä (A) on katkaistu 16 mm, keskimäinen käyrä (B) 22,4 mm ja alin rajakäyrä (C) 25 mm seulalla laboratorion näytevalmistusteknistä syistä.

- A ja B mukaan, jos tuotteen käyttötarkoitus on osittain vanhan kerroksen stabilointi
- B ja C mukaan, jos tuotteen käyttötarkoitus on uuden kerroksen stabilointi
- A, B ja C mukaan, jos tuotteen on tarkoitus soveltua sekä uuden että vanhan kerroksen stabilointiin.



Kuva 35. Referenssistabilointimassojen ohjekäyrät A - C  
(vaahtobitumi-, komposiitti- ja remixer-stabilointi)

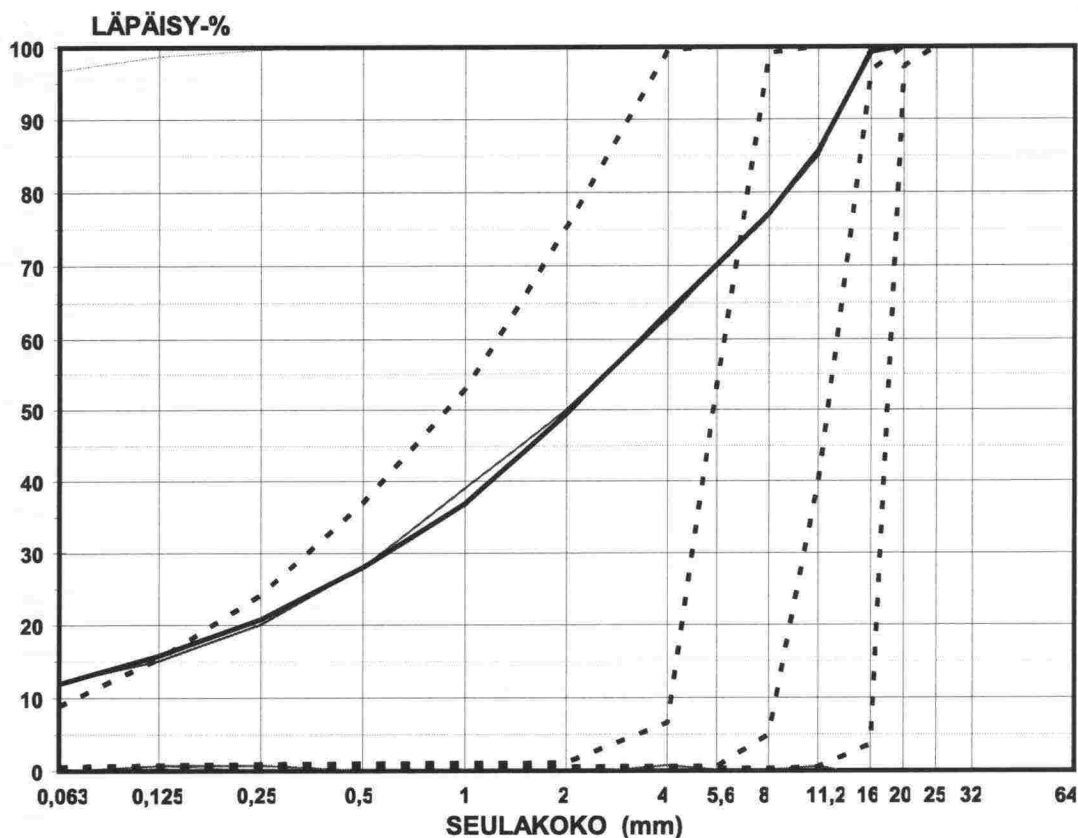
## Referenssistabilointimassojen rakeisuus A ("Teiskon" hienoaines)

Referenssimassatyypit: VBST, KOST ja SST

Täytejauhe: Seos 1: " Teisko "

Kiviaines: 2005 B

Muuta: A-käyrä



Tiheydet: 2701				2653	2714	2716	2678	2680
Seososuudet: 100,0 %				7,0 %	56,0 %	13,0 %	24,0 %	
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	T 0/4 -05B	T 4/8 -05B	8/16 -05B	
0,063	-0,1	12	11,9	96,7	8,9	0,5	0,3	0,1
0,125	0,7	15	15,7	98,7	15	1	0	0
0,25	0,7	20	20,7	99,6	24	1	0	0
0,5	0,0	28	28,0	99,9	37	1	0	0
1	-2,1	39	36,9	100	53	1	0	0
2	-0,6	50	49,4	100	75	1	1	0
4	0,7	63	63,7	100	100	7	1	0
5,6	0,1	70	70,1	100	100	54	1	0
8	0,1	77	77,1	100	100	99	5	0
11,2	0,6	85	85,6	100	100	100	40	0
16	-0,8	100	99,2	100	100	100	97	4
20	0,0	100	100,0	100	100	100	100	97
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100



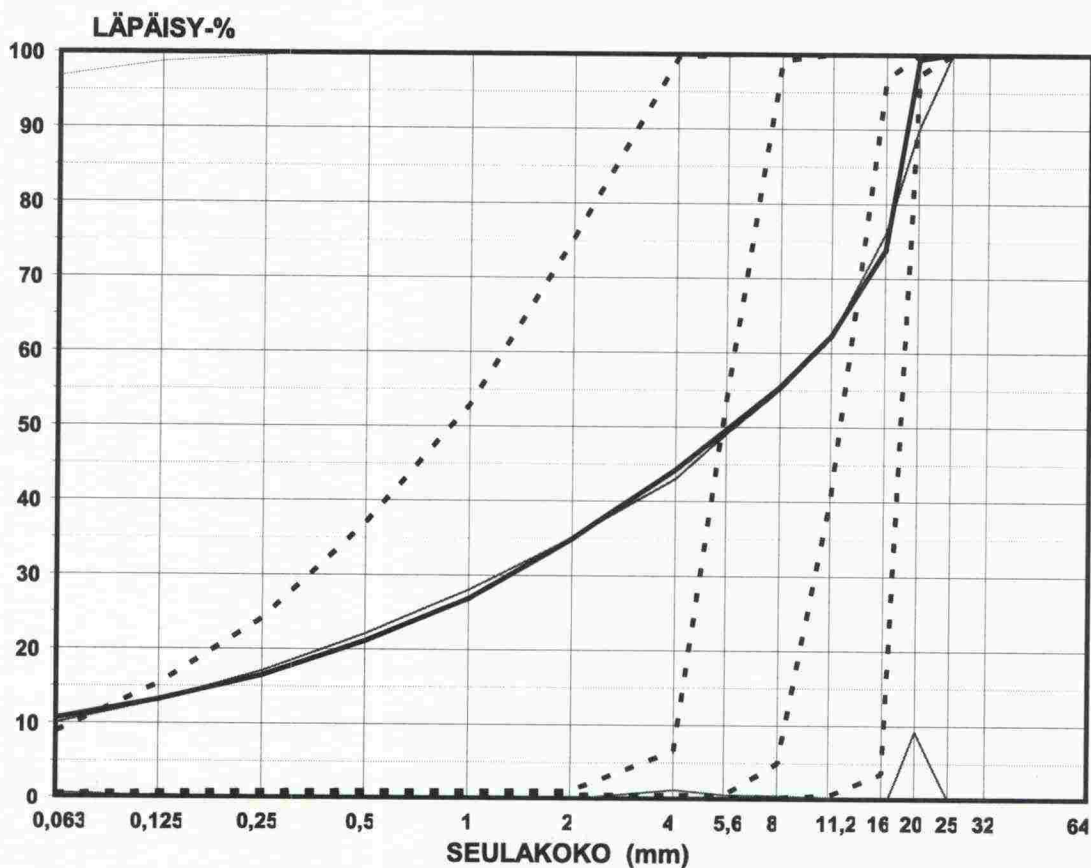
# Referenssistabilointimassojen rakeisuus B ("Teiskon" hienoaaines)

Referenssimassatyypit: VBST, KOST ja SST

Täytejauhe: Seos 1: "Teisko"

Kiviaines: 2005 B

Muuta: B-käyrä



Tiheydet: 2694				2653	2714	2716	2678	2680		
Seososuudet: 100,0 %				7,5 %	36,0 %	11,0 %	19,0 %	26,5 %		
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	T 0/4 -05E	T 4/8 -05E	T 8/16 -05E	T 16/22,4 -05B		
0,063	0,6	10	10,6	96,7	8,9	0,5	0,3	0,1		
0,125	0,1	13	13,1	98,7	15	1	0	0		
0,25	-0,6	17	16,4	99,6	24	1	0	0		
0,5	-0,9	22	21,1	99,9	37	1	0	0		
1	-1,2	28	26,8	100	53	1	0	0		
2	-0,1	35	34,9	100	75	1	1	0		
4	1,2	43	44,2	100	100	7	1	0		
5,6	0,6	49	49,6	100	100	54	1	0		
8	0,4	55	55,4	100	100	99	5	0		
11,2	0,2	62	62,2	100	100	100	40	0		
16	-2,2	76	73,8	100	100	100	97	4		
20	9,3	90	99,3	100	100	100	100	97		
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100		
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100		

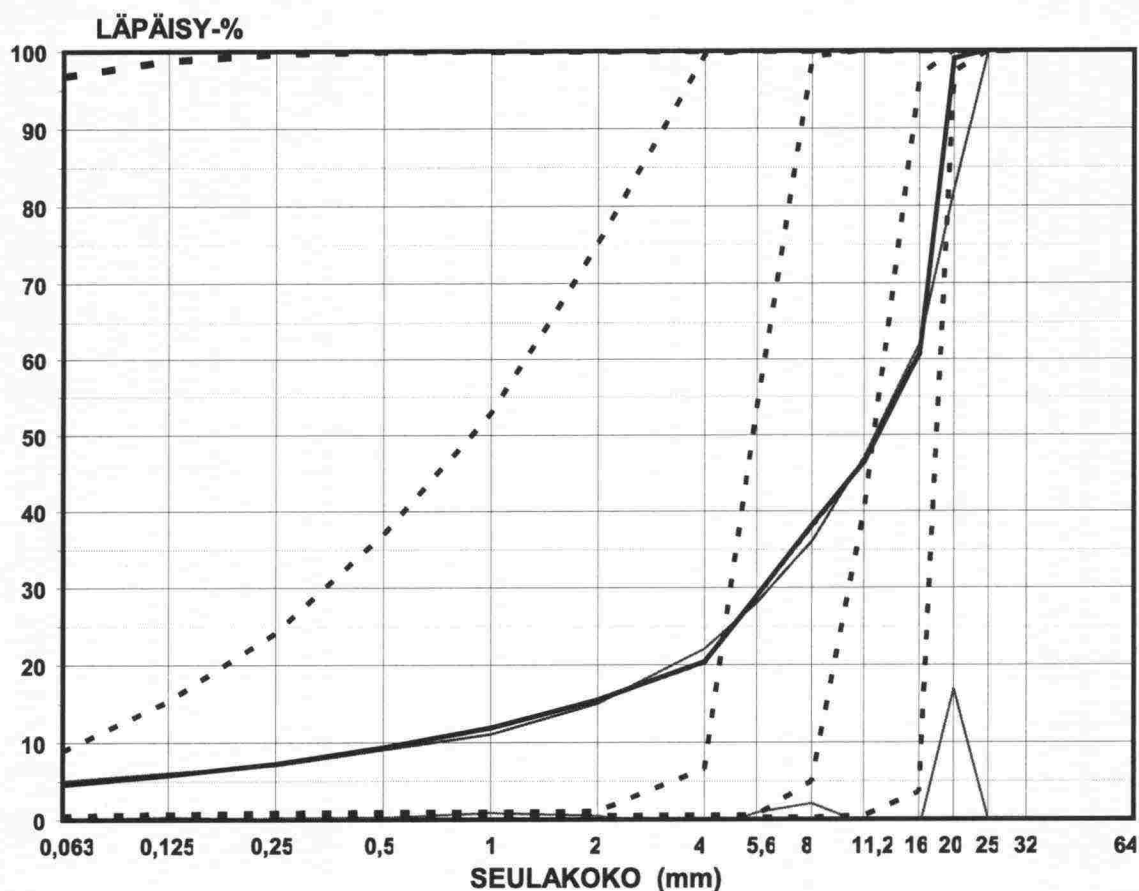
## Referenssistabilointimassojen rakeisuus C

Referenssimassatyypit: VBST, KOST ja SST

Täytejauhe: Seos 1: "Teisko"

Kiviaines: 2005 B

Muuta: C-käyrä



Tiheydet: 2691				2653	2714	2716	2678	2680
Seososuudet: 100,0 %				3,0 %	16,0 %	18,0 %	23,0 %	40,0 %
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	T 0/4 -05E	T 4/8 -05E	8/16 -05E	16/22,4 -05B
0,063	-0,5	5	4,5	96,7	8,9	0,5	0,3	0,1
0,125	-0,3	6	5,7	98,7	15	1	0	0
0,25	0,2	7	7,2	99,6	24	1	0	0
0,5	0,3	9	9,3	99,9	37	1	0	0
1	0,8	11	11,8	100	53	1	0	0
2	0,5	15	15,5	100	75	1	1	0
4	-1,7	22	20,3	100	100	7	1	0
5,6	0,9	28	28,9	100	100	54	1	0
8	2,1	36	38,1	100	100	99	5	0
11,2	-0,6	47	46,4	100	100	100	40	0
16	-1,3	62	60,7	100	100	100	97	4
20	16,9	82	98,9	100	100	100	100	97
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100

## Referenssistabilointimassojen rakeisuus A

Referenssimassatyypin MHST

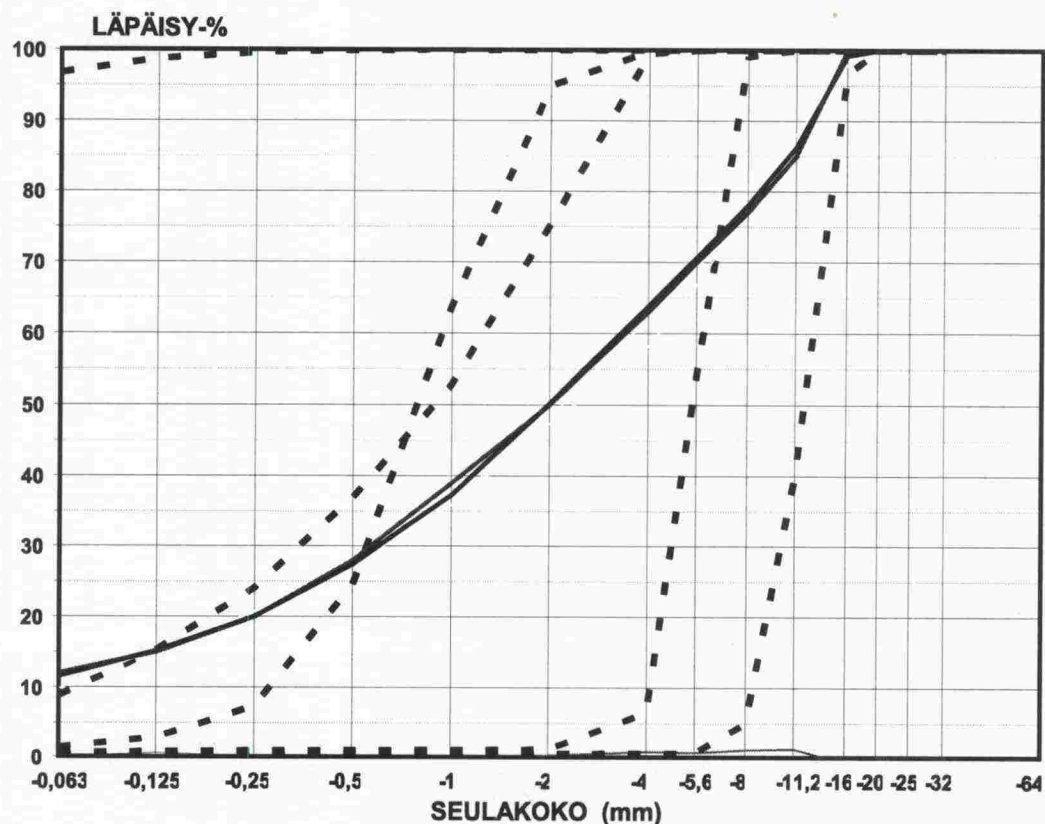
Täytejauhe: Seos 1: "Teisko"

Lisäaineet:

Kiviaines: 2005 B

Muuta: A-käyrä

Massan tiheys:



Tiheydet: 2814			?	2714	2716	2678	2653	
Seososuudet: 100,0 %			4,0 %	52,0 %	14,0 %	23,0 %	0,0 %	7,0 %
Seula	Erotus	Ohje	Seos	MHk Raahen	0/4 -05E	4/8 -05E	8/16 -05B	Seos 1
0,063	-0,4	12	11,6	1,4	8,9	0,5	0,3	96,7
0,125	0,2	15	15,2	2,8	15	1	0	98,7
0,25	0,0	20	20,0	7,4	24	1	0	99,6
0,5	-0,5	28	27,5	24,5	37	1	0	99,9
1	-1,7	39	37,3	63,9	53	1	0	100
2	0,2	50	50,2	95,0	75	1	1	100
4	0,8	63	63,8	99,8	100	7	1	100
5,6	0,6	70	70,6	100,0	100	54	1	100
8	1,0	77	78,0	100	100	99	5	100
11,2	1,2	85	86,2	100	100	100	40	100
16	-0,8	100	99,2	100	100	100	97	100
20	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100



## Referenssistabilointimassojen rakeisuus B

Referenssimassatyyppi: MHST

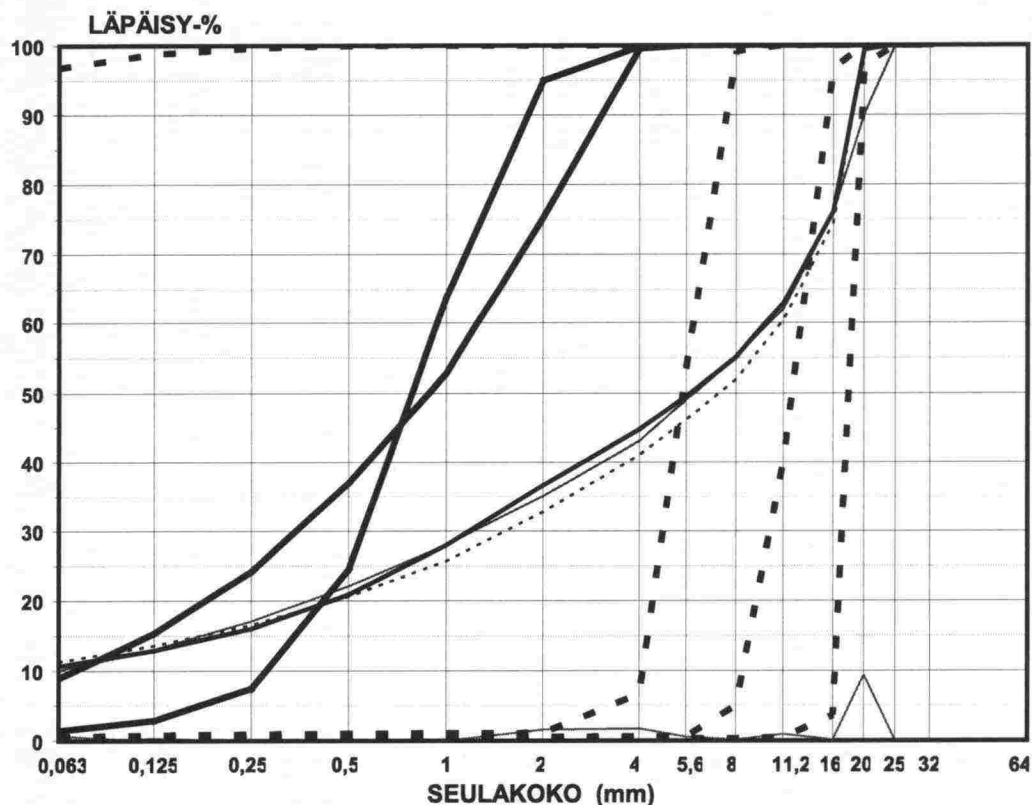
Täytejauhe: Seos 1: "Teisko "

Lisäaineet:

Kiviaines: 2005 B

Muuta: B-käyrä

Iassin tiheys:



Tiheydet: 2864			?	2714	2716	2678	2680	2653	
Seososuudet: 100,0 %			6,0 %	30,0 %	10,0 %	22,0 %	24,0 %	8,0 %	
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Mhk Raahet	0/4 -05E	4/8 -05E	8/16 -05E	16/22.4 -0	Seos 1
0,063	0,6	10	10,6	1,4	8,9	0,5	0,3	0,1	96,7
0,125	-0,1	13	12,9	2,8	15	1	0	0	98,7
0,25	-1,1	17	15,9	7,4	24	1	0	0	99,6
0,5	-1,2	22	20,8	24,5	37	1	0	0	99,9
1	0,0	28	28,0	63,9	53	1	0	0	100
2	1,6	35	36,6	95,0	75	1	1	0	100
4	1,7	43	44,7	99,8	100	7	1	0	100
5,6	0,5	49	49,5	100,0	100	54	1	0	100
8	0,1	55	55,1	100	100	99	5	0	100
11,2	0,9	62	62,9	100	100	100	40	0	100
16	0,1	76	76,1	100	100	100	97	4	100
20	9,3	90	99,3	100	100	100	100	97	100
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100

# Referenssistabilointimassojen rakeisuus C

Referenssimassatyypin MHST

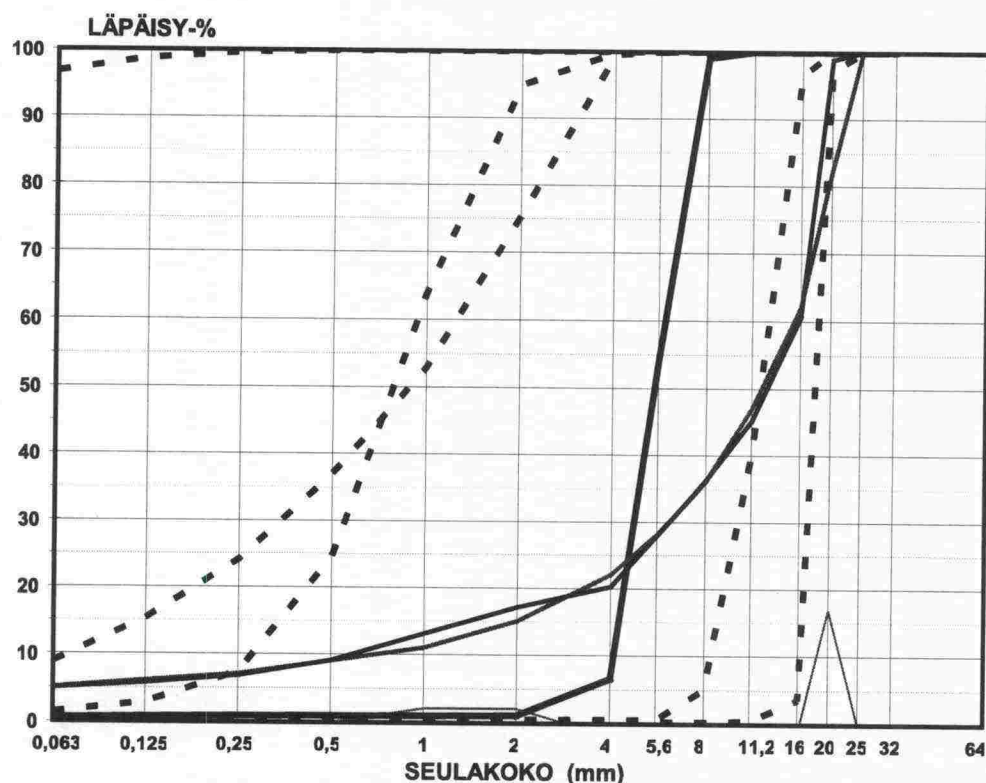
Täytejauhe: Seos 1: "Teisko "

Lisäaineet:


Kiviaines: 2005 B

Muuta: C-käyrä

lavan tiheys:



Tiheydet: 2890				?	2714	2716	2678	2680	2653
Seososuudet: 100,0 %				7,0 %	8,0 %	16,0 %	25,0 %	40,0 %	4,0 %
Seula	Erotus	Ohje	Seos	MHk Raahen	0/4 -05E	4/8 -05E	8/16 -05E	16/22.4 -0	Seos 1
0,063	-0,1	5	4,9	1,4	8,9	0,5	0,3	0,1	96,7
0,125	-0,3	6	5,7	2,8	15	1	0	0	98,7
0,25	-0,2	7	6,8	7,4	24	1	0	0	99,6
0,5	0,0	9	9,0	24,5	37	1	0	0	99,9
1	2,1	11	13,1	63,9	53	1	0	0	100
2	2,1	15	17,1	95,0	75	1	1	0	100
4	-1,8	22	20,2	99,8	100	7	1	0	100
5,6	-0,2	28	27,8	100,0	100	54	1	0	100
8	0,2	36	36,2	100	100	99	5	0	100
11,2	-1,8	47	45,2	100	100	100	40	0	100
16	-1,4	62	60,6	100	100	100	97	4	100
20	16,9	82	98,9	100	100	100	100	97	100
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100



ISSN 1459-1553  
ISBN 978-951-803-965-8  
TIEH 3201072-v